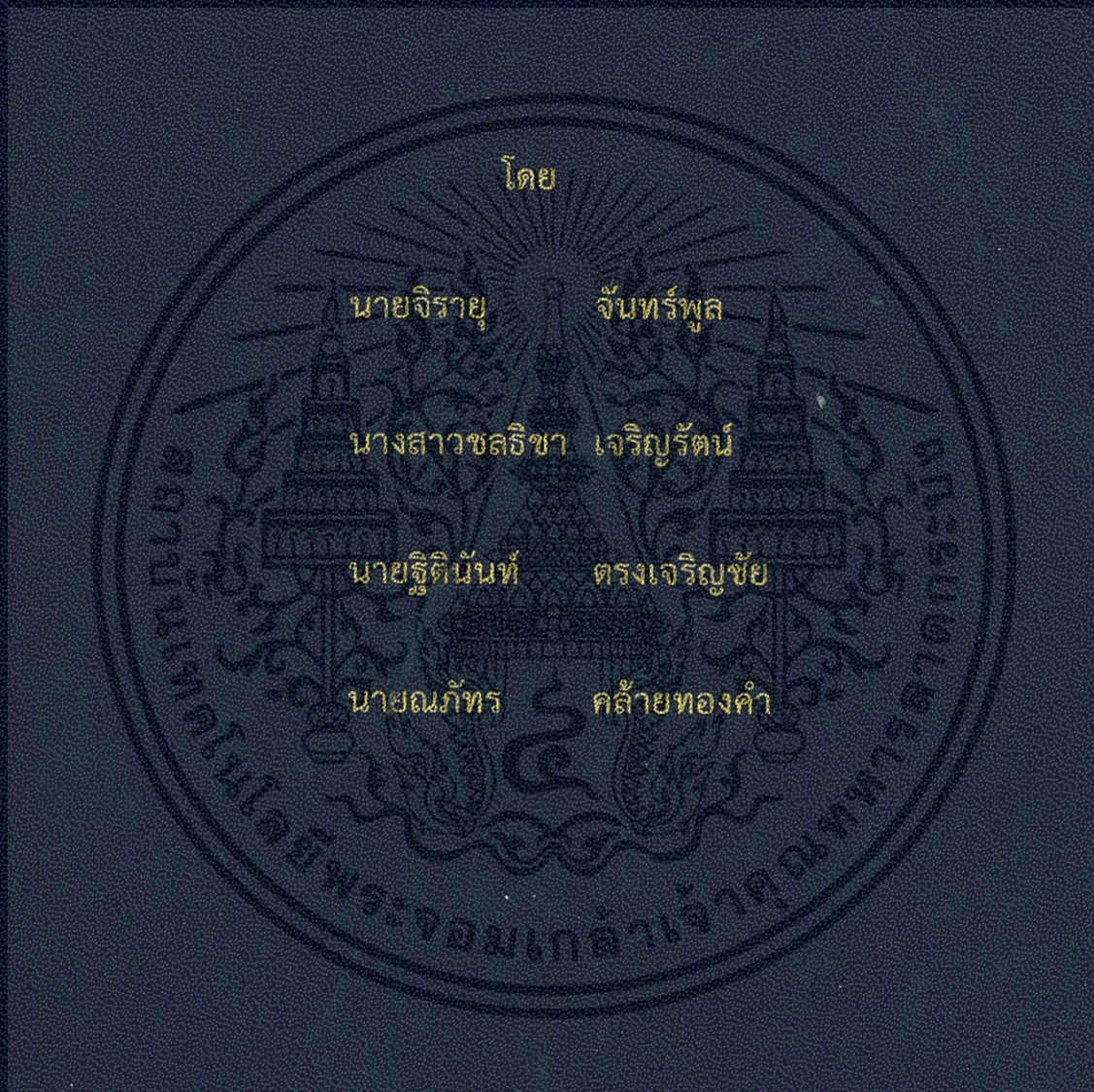


เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์  
SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2555

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์  
SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR



โดย  
นายจรรยา จันทรพูล  
นางสาวชลธิชา เจริญรัตน์  
นายฐิตินันท์ ตรงเจริญชัย  
นายณภัทร คล้ายทองคำ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์  
SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR



รศ.ดร.สุวัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2555

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

ผู้จัดทำ



นายจิรายุ จันทร์พูล

นางสาวชลธิชา เจริญรัตน์

นายฐิตินันท์ ตรงเจริญชัย

นายณภัทร คล้ายทองคำ

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รศ.ดร.สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

นายจิรายุ	จันทร์พูล	52010169
นางสาวชลธิชา	เจริญรัตน์	52010226
นายฐิตินันท์	ตรงเจริญชัย	52010282
นายณภัทร	คล้ายทองคำ	52010292

รศ.ดร.สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2555

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการปรับปรุงตัวฟลายวีลแบบแนวแกนนอน เพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส แบบ 8/6 สามารถหมุนได้ด้วยความเร็วสูงกว่า Base Speed โดยการปรับพิคัดของวงจรขับเคลื่อน รวมทั้งตัวโปรแกรมของวงจรควบคุม ในงานวิจัยนี้จะใช้ DSP320F2812 เป็นตัวควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ เมื่อเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ทำงานเป็นมอเตอร์เพื่อหมุนฟลายวีลให้เก็บสะสมพลังงานจลน์ และควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ให้ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมี ฟลายวีลเป็นต้นกำลังเพื่อคืนพลังงานที่เก็บไว้ และนำมาประยุกต์ใช้เป็น UPS โดยการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นให้รักษาระดับแรงดัน DC Bus 48 โวลต์ ที่สภาวะโหลดคงที่

## SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR

Jirayu	Janpool	52010169
Chonticha	Charoenrat	52010226
Titinant	Trongjaroenchai	52010282
Naphat	Khlaithongkham	52010292

Assoc.Prof.Dr.Supat Kittiratsatcha Supervisor

2012

### Abstract

This thesis presents a method to improve horizontal-axis flywheel of 4-phases 8/6 switched reluctance generator (SRG) by adjust driver circuit to increase the efficiency of flywheel in order to make flywheel rotational speed increasing more than base speed. Including control circuit adjustment, by using DSP320F2812 to control a switched-reluctance machine. When acting as motor flywheel spin and gain kinetic energy. In generator mode kinetic energy stored in the flywheel applies a torque, which is converted to electric energy. Using switched-reluctance machine as UPS by control voltage of generator to DC bus 48 volt at constant load.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการขอพระขอบคุณและรู้สึกซาบซึ้งต่อความกรุณาที่อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สุพัฒน์ กิตติรัตน์สังจา ที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆ เพื่อให้โครงการมีความก้าวหน้าเรื่อยมา ตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้แก่คณะผู้จัดทำในครั้งนี้ ถ้าปราศจากท่าน เหล่านี้ โครงการนี้คงไม่สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณพี่ไพวรรณ เกิดตรวจ และพี่กฤตทวิ วงศ์งาม รวมถึงพี่ ๆ ที่ห้อง PEARL LAB และคณะผู้จัดทำต้องขอขอบคุณเพื่อนๆร่วมห้องปฏิบัติการ (PEARL LAB) ที่คอยเอาใจใส่และคอยให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ มาโดยตลอด รวมถึงเพื่อนๆห้องโครงการอื่นๆ ที่คอยสอบถามถึงความก้าวหน้าของโครงการ และให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่อุปการะ เลี้ยงดูและคอยให้กำลังใจให้ในยามที่เหนื่อยล้า และท้อแท้

คุณประโยชน์ประการใดที่พึงมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบคุณคุณประโยชน์ประการนั้นให้แก่ผู้มีอุปการะคุณทุกท่าน

ขอขอบคุณ

คณะผู้จัดทำ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและที่มาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ.....	2
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 หลักการพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์.....	5
2.1.1 ค่ารีลักแตนซ์ (Reluctance; $\mathcal{R}$ ).....	5
2.1.2 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์.....	10
2.1.3 ตำแหน่ง Aligned และตำแหน่ง Unaligned.....	11
2.1.4 กราฟ Magnetizing.....	12
2.1.5 แรงบิด.....	12
2.2 วงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตซ์ต่อเฟส.....	14
2.3 การทำงานเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG.....	15
2.3.1 การทำงานในโหมดควบคุมกระแส.....	15
2.3.2 การทำงานในโหมดกระแสพัลส์.....	17
2.4 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของฟลายวีล.....	18
2.4.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของฟลายวีล.....	19
2.4.2 ประเภทของฟลายวีล.....	19
2.4.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.4.4 ข้อดีของระบบสะสมพลังงานโดยใช้ฟลายวีล.....	22
2.4.5 ข้อเสียของระบบสะสมพลังงานโดยใช้ฟลายวีล.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.6 การพัฒนาประสิทธิภาพของระบบ.....	23
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง.....	24
3.1 โครงสร้างของระบบและการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์.....	24
3.2 การออกแบบระบบพลังงานโดยใช้ฟลายวีล.....	25
3.2.1 การหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยและพลังงานจลน์ของฟลายวีลชุดเดิม .....	25
3.2.2 การออกแบบฟลายวีลชุดใหม่.....	26
3.3 ระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์.....	27
3.4 โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์.....	28
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	30
4.1 วงจรควบคุมการทำงาน.....	30
4.1.1 สัญญาณขั้วนำเกิดจาก DSP.....	30
4.1.2 สัญญาณจากตัว Encoder.....	31
4.1.3 สัญญาณจาก Sensor 4 ที่อยู่ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์.....	31
4.1.4 การวัดตำแหน่งโรเตอร์ที่ได้จากวงจร DAC ของตัวประเมินผลสัญญาณ ดิจิตอล (DSP) เทียบกับ Index และ Sensor ของ SRG.....	32
4.1.5 สัญญาณจาก Sensor ตัวที่ 3 ของ SRG, สัญญาณ Index และสัญญาณ ขั้วเกิดของเฟส A.....	33
4.2 การทดสอบขณะที่ทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า (SRM) .....	33
4.2.1 ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping (Motor).....	34
4.2.2 ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping (Motor).....	36
4.2.3 ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Single Pulse (Motor).....	36
4.3 การทดสอบขณะที่ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (SRG).....	36
4.3.1 ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping (Motor).....	36
4.3.2 ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping (Motor).....	38
4.3.3 ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Single Pulse (Motor).....	38
4.4 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (SRG) .....	38
4.5 การปรับมุมเพื่อเร่งความเร็วขณะที่ให้ SRM เป็นต้นกำลังทางกลในการหมุน ฟลายวีล.....	39
4.6 ผลการทดสอบขณะที่ SRM เป็นต้นกำลังทางกลในการหมุนฟลายวีล.....	40
4.6.1 ที่ความเร็ว 2,000 rpm ในโหมด Motor.....	40

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6.2 ที่ความเร็ว 4,000 rpm ในโหมด Motor.....	40
4.6.3 ที่ความเร็ว 6,500 rpm ในโหมด Motor.....	41
4.7 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (SRG) โดยคิดจากการวัดกำลังขาเข้าและกำลังขาออกของ SRG ที่ความเร็วและโหลดต่าง .....	42
4.8 ผลการทดสอบการจ่ายโหลดโดยนำพลังงานที่เก็บสะสมจากฟลายวีลมาช้.....	44
4.8.1 โหลดขนาด 150 W.....	44
4.8.2 โหลดขนาด 425 W.....	45
4.8.3 โหลดขนาด 580 W.....	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	46
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	46
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	47
เอกสารอ้างอิง.....	48
ภาคผนวก.....	49
บทความวิชาการ.....	109
ประวัติผู้เขียน.....	114

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก.....	6
2.2 แกนเหล็กที่มีวัตตสองชนิดวางแบบอนุกรม.....	7
2.3 วงจรสมมูลย์ที่มีคาร์ริกแทนซ์ต่ออนุกรม.....	8
2.4 แกนเหล็กที่มีวัตตสองชนิดวางแบบขนาน.....	8
2.5 วงจรสมมูลย์ที่มีคาร์ริกแทนซ์ต่อขนาน.....	9
2.6 จำนวนสเตเตอร์และโรเตอร์ แบบ 8/6.....	10
2.7 (ก) SRM แบบ 8/6 ที่ตำแหน่ง Aligned (เฟส A) (ข) SRM แบบ 8/6 ที่ตำแหน่ง Unaligned (เฟส A).....	11
2.8 กราฟ Magnetizing .....	12
2.9 ค่าความเหนี่ยวนำและแรงบิดเมื่อป้อนกระแสเข้าขดลวดเฟส.....	13
2.10 ค่าความเหนี่ยวนำแต่ละเฟสของ SRM แบบ 8/6 ในการหมุน 1 รอบ.....	13
2.11 วงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟส.....	14
2.12 ทิศทางการไหลของกระแสเฟสขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	15
2.13 (ก) ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG ในโหมด Soft Chopping (ข) ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG ในโหมด Hard Chopping.....	16
2.14 (ก) ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG ในโหมด Single Pulse ขณะที่แรงดันไฟฟ้าต้านกลับมากกว่าดีซีบัส (ข) ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG ในโหมด Single Pulse ขณะที่แรงดันไฟฟ้าต้านกลับเท่ากับดีซีบัส (ค) ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG ในโหมด Single Pulse ขณะที่แรงดันไฟฟ้าต้านกลับน้อยกว่าดีซีบัส.....	17
2.15 โครงสร้างและส่วนประกอบของฟลายวีล.....	19
2.16 ฟลายวีลในรูปแบบต่างๆ	
(ก) แนวแกนนอน	
(ข) แนวแกนตั้ง.....	20

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.17 ทรงกระบอกรูปทรงต่างๆ	
(ก) ทรงกระบอกปลายเปิด	
(ข) ทรงกระบอกที่มีความหนาเป็นวงแหวน.....	21
(ค) ทรงกระบอกตัน .....	21
2.18 การเปรียบเทียบพลังงานที่เก็บสะสมในฟลายวีลกับแหล่งสะสมพลังงานประเภทอื่นๆ .....	22
3.1 ลักษณะโครงสร้างของระบบควบคุมและวงจรกำลังสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	
แบบสวิตช์รีลักแตนซ์ .....	24
3.2 การออกแบบระบบสะสมพลังงานโดยใช้ฟลายวีล .....	29
4.1 สัญญาณขั้วเกิดของ IGBT ตัวบนที่ได้จากช่อง PWM ของตัว DSP ขณะทำงานใน	
โหมดควบคุมกระแสแบบ Single Pulse .....	30
4.2 สัญญาณ QEPI (Index), QEP1 และ QEP2 ที่ได้จากตัว Encoder .....	31
4.3 สัญญาณจาก Sensor ของ SRG ทั้ง 4 ตัว .....	31
4.4 Sensor ของ SRG ตัวที่ 3, สัญญาณ Index, มุมทางไฟฟ้าของเฟส A	
และมุมทางไฟฟ้าของเฟส B.....	32
4.5 สัญญาณจาก Sensor ตัวที่ 3 ของ SRG, สัญญาณ Index และสัญญาณขั้วเกิดของเฟส A	
ตัวบนและตัวล่าง.....	33
4.6 สัญญาณขั้วเกิดเฟส A ตัวบนและล่าง, แรงดันเฟส และกระแสเฟส ขณะทำงานในโหมดควบคุม	
กระแสแบบ Soft Chopping Motor) .....	34
4.7 กระแสขณะทำงานเป็นมอเตอร์ในโหมดควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping ทั้ง 4 เฟส	
(Motor).....	34
4.8 สัญญาณขั้วเกิดเฟส A ตัวบนและล่าง, แรงดันเฟส และกระแสเฟส ขณะทำงานในโหมดควบคุม	
กระแสแบบ Hard Chopping (Motor) .....	35
4.9 สัญญาณขั้วเกิดเฟส A ตัวบนและล่าง, แรงดันเฟส และกระแสเฟส ขณะทำงานในโหมดควบคุม	
กระแสแบบ Single Pulse (Motor) .....	35

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 สัญญาณขับเคลื่อนเฟส A ตัวบนและล่าง, แรงดันเฟส และกระแสเฟส ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping (Generator) .....	36
4.11 สัญญาณขับเคลื่อนเฟส A ตัวบนและล่าง, แรงดันเฟส และกระแสเฟส ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping (Generator) .....	37
4.12 สัญญาณขับเคลื่อนเฟส A ตัวบนและล่าง, แรงดันเฟส และกระแสเฟส ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Single Pulse (Generator) .....	37
4.13 แรงดันเฟส และ กระแสเฟส ขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความเร็ว 6,000 rpm.....	38
4.14 สัญญาณขับเคลื่อนตัวบนและล่าง, แรงดันเฟส และกระแสเฟส ขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความเร็ว 5,000 rpm.....	39
4.15 แรงดันเฟส, กระแสเฟส, แรงดันขาเข้าและกระแสขาเข้า ที่ความเร็ว 2,000 rpm.....	40
4.16 แรงดันเฟส, กระแสเฟส, แรงดันขาเข้าและกระแสขาเข้า ที่ความเร็ว 4,000 rpm.....	40
4.17 แรงดันเฟส, กระแสเฟส, แรงดันขาเข้าและกระแสขาเข้า ที่ความเร็ว 6,500 rpm.....	41
4.18 แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบของ SRM เทียบกับเวลา จากความเร็ว 0 rpm ถึง 6,500 rpm.....	41
4.19 แรงดันไฟฟ้าขาเข้า, กระแสไฟฟ้าขาเข้า, แรงดันไฟฟ้าขาออก และกระแสไฟฟ้าขาออกที่ความเร็ว 5,000 rpm.....	42
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วรอบขณะจ่ายโหลดขนาดต่าง ๆ.....	43
4.21 แรงดันไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบของ SRG เทียบกับเวลาขณะจ่ายโหลด 150 W...44	44
4.22 แรงดันไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบของ SRG เทียบกับเวลาขณะจ่ายโหลด 425 W...45	45
4.23 แรงดันไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบของ SRG เทียบกับเวลาขณะจ่ายโหลด 580 W...45	45

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน .....	3
2.1 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก.....	6
3.1 อุปกรณ์และพิกัดของอุปกรณ์.....	27
4.1 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	30



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและที่มาของโครงการ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่แรงบิดเกิดจากการหมุนของส่วนที่เคลื่อนที่ได้ไปยังตำแหน่งที่ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมากที่สุดและสามารถเคลื่อนที่ได้ไปยังตำแหน่งที่ให้ค่าความเหนี่ยวนำมากที่สุดตำแหน่งอื่นๆ ได้โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดเฟสถัดไป ซึ่งเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์มีการออกแบบโครงสร้างง่าย ไม่ซับซ้อน แต่การควบคุมมีความยุ่งยากและซับซ้อน จึงจำเป็นต้องทราบตำแหน่งของโรเตอร์ เพื่อที่จะป้อนพลังงานให้กับขดลวดในเฟสต่างๆได้อย่างเหมาะสมให้ได้แรงบิดในทิศทางที่ต้องการ หากต้องการให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ในโหมดเจนเนอเรเตอร์มีการทำงานอย่างเหมาะสม จำเป็นต้องปรับความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ในโหมดมอเตอร์ให้มากกว่า Base Speed ในขณะที่หมุนฟลายวีล เนื่องจากความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ที่มากกว่า Base Speed จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าด้านกลับมีค่าสูง จึงทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ปริมาณพันธึ่ลุ่มนี้จึงได้นำเสนอเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ในโหมดเจนเนอเรเตอร์ให้ที่มีความเร็วมากกว่า Base Speed โดยการปรับมุมเริ่มนำกระแส เพื่อป้อนพลังงานให้กับขดลวดในแต่ละเฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ในโหมดเจนเนอเรเตอร์ให้เหมาะสม ปรับพิคตของอุปกรณ์ และการออกแบบ ฟลายวีล ให้สามารถรองรับความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ในโหมดเจนเนอเรเตอร์ที่มากกว่า Base Speed ได้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานและโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส แบบ 8/6
2. เพื่อศึกษาโครงสร้าง ส่วนประกอบ และคุณสมบัติของฟลายวีลเดิม ที่นำมาใช้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส แบบ 8/6
3. ออกแบบฟลายวีล ให้สามารถนำมาใช้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส แบบ 8/6 ที่ความเร็วสูงกว่า Base Speed (6,000 รอบต่อนาที)
4. ปรับพิคตของอุปกรณ์ในวงจรให้สูงขึ้น และ ปรับปรุงโปรแกรม เพื่อให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์สามารถหมุนที่ความเร็วสูงกว่า Base Speed ในขณะที่ขับฟลายวีล

### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการงาน

1. ศึกษาปรับปรุง และ ออกแบบฟลายวีลให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์สามารถทำงานได้ที่ความเร็วสูงกว่า Base Speed (6,000 รอบต่อนาที) ในขณะขับฟลายวีล
2. ศึกษาพิกัดของอุปกรณ์แต่ละชิ้นที่นำมาใช้ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส แบบ 8/6
3. ปรับพิกัดของอุปกรณ์ เพื่อให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส แบบ 8/6 ในโหมดเจนเนอเรเตอร์ สามารถหมุนที่ความเร็วสูงกว่า Base Speed ขณะขับฟลายวีล
4. ศึกษาและแก้ไขโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส แบบ 8/6 ในโหมดเจนเนอเรเตอร์ร่วมกับฟลายวีลโดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) เบอร์ TMS320F2812

### 1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการงานศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์
2. ศึกษาการออกแบบฟลายวีล เพื่อให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์สามารถทำงานที่ความเร็วสูงกว่า Base Speed ขณะขับฟลายวีล
3. ศึกษาการใช้โปรแกรม จากหนังสือและตัวอย่างโปรแกรมของโครงการงานในปีการศึกษาที่ผ่านมา เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขโปรแกรมเพื่อขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ ในโหมดเจนเนอเรเตอร์ให้สามารถหมุนที่ความเร็วมากกว่า Base Speed ได้ในขณะขับฟลายวีล
4. ทดสอบการทำงานร่วมกันของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส แบบ 8/6 กับฟลายวีล
5. สรุปผลการศึกษาพร้อมรวบรวมข้อมูลเพื่อจัดทำรูปเล่มโครงการงาน

## 1.5 แผนการดำเนินงาน

## ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2555							พ.ศ. 2556		
	มี.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
ศึกษาทฤษฎีและการทำงานของมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์	↔									
ศึกษาทฤษฎีและการทำงานของเจนเนอเรเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์	↔									
ศึกษาการทำงานและการออกแบบของฟลายวีล	↔	↔								
ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการปรับปรุงเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ จากปริญาานิพนธ์ของปีการศึกษาที่ผ่านมา	↔	↔								
ศึกษาพิภัดของอุปกรณ์			↔							
ศึกษาวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ไดโอด				↔						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2555							พ.ศ. 2556		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
ออกแบบฟลายวีล			←→							
ปรับปรุงฟลายวีลจากเดิม					←→					
ปรับพิกัดของอุปกรณ์ของใน วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ ไดโอดให้สูงขึ้น						←→				
แก้ไขโปรแกรมที่ควบคุมการ หมุนของเครื่องจักรกลไฟฟ้า แบบสวิตซ์รีล็กแตนซ์						←→				
ทดสอบการเดินเครื่องอุปกรณ์ที่ ปรับปรุงทั้งหมดพร้อมกัน								←→		
บันทึกผลการทดลอง และ ปรับปรุงผลงาน								←→		
สรุปผลการวิจัย พร้อมจัดทำ รูปเล่มปริญญานิพนธ์									←→	

#### 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการ

1. เข้าใจทฤษฎีและหลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีล็กแตนซ์ ขณะที่ทำงานเป็นมอเตอร์ (SRM) และ เจนเนอเรเตอร์ (SRG)
2. สามารถเข้าใจการทำงานของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) เบอร์ด TMS320F2812 ได้
3. เข้าใจถึงปัญหาและการแก้ไขโปรแกรม พร้อมทั้งออกแบบฟลายวีลให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีล็กแตนซ์สามารถทำงานได้ที่ความเร็วสูงกว่า Base Speed
4. ฝึกทักษะการทำงานเป็นหมู่คณะ การรับฟังความคิดเห็นของผู้อื่น ทำให้เป็นคนตรงต่อเวลาและมีความรับผิดชอบมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 หลักการพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตช์รีลักแตนซ์ [1]

เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์มีโครงสร้างที่ง่ายประกอบไปด้วยสเตเตอร์และโรเตอร์ โดยจะมีขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอยู่ที่สเตเตอร์ แต่ไม่มีขดลวดสนามหรือแม่เหล็กที่โรเตอร์ซึ่งจะทำให้การสร้างเครื่องจักรกลชนิดนี้ราคาถูกกว่าแบบอื่น ๆ โดยทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์นั้นจะมีลักษณะเป็นแบบขั้วยื่น (Salient Poles) สำหรับหลักการการทำงานจะเกิดแรงบิดขึ้นในช่วงเวลาที่ส่วนที่เคลื่อนที่ได้ (โรเตอร์) เคลื่อนไปยังตำแหน่งที่มีค่าอินดักแตนซ์สูงสุด และสามารถเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่มีค่าอินดักแตนซ์สูงสุดที่ตำแหน่งอื่นได้โดยการหยุดป้อนกระแสไฟฟ้ากระตุ้นเฟสเดิมแล้วกระตุ้นให้กับขดลวดที่อยู่ในเฟสถัดไป ในช่วงการทำงานเป็นมอเตอร์จะกระตุ้นขดลวดเฟสเมื่อค่าอินดักแตนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น และถ้าต้องการให้ทำงานเป็นเจนเนอเรเตอร์ จะกระตุ้นขดลวดเฟสเมื่อค่าอินดักแตนซ์มีค่าลดลง เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์จะมีกระแสไหลเข้าในแต่ละเฟสเพียงทิศทางเดียวและแต่ละเฟสยังเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งจะทำให้มีเสถียรภาพมากกว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดอื่นซึ่งทำให้ยากต่อการลัดวงจร จึงเหมาะในงานที่มีความต้องการเฉพาะเจาะจงเนื่องจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์มีจุดเด่นคือมีความเร็วรอบและความทนทานสูงแต่ยากต่อการควบคุม ลัดวงจร จึงเหมาะในงานประเภทการขับเคลื่อนปั๊ม พัดลม รถยนต์ไฟฟ้า และเครื่องซักผ้า เป็นต้น

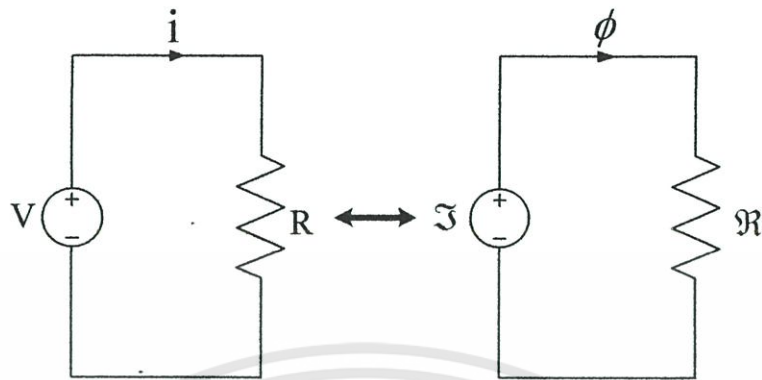
#### 2.1.1 ค่ารีลักแตนซ์ (Reluctance; $\mathcal{R}$ )

วงจรสมมูลย์ทางแม่เหล็กจะคล้ายกับวงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าแบบมีเฉพาะความต้านทานดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยที่จะสามารถเปรียบเทียบกันได้ดังตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าเราสามารถให้หลักการเดียวกันกับวงจรไฟฟ้าที่มีเฉพาะตัวต้านทานในการคำนวณหาผลเฉลยของวงจรได้ ซึ่ง  $\mathcal{N}$  จะเปรียบเสมือนกับแรงดันไฟฟ้า โดยที่

$$\mathcal{N} = Ni \quad (2.1)$$

เมื่อ  $N$  คือจำนวนรอบ และ  $i$  คือกระแสไฟฟ้าในขดลวด เส้นแรงแม่เหล็กจะเปรียบเสมือนกับกระแสไฟฟ้า

ดังนั้นเราสามารถกำหนดนิยามของรีลักแตนซ์ได้ดังนี้



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก

วงจรสมมูลทางไฟฟ้า	วงจรสมมูลทางแม่เหล็ก
Voltage, $V$	Magnetomotive Force (mmf), $\mathfrak{F}$
Current, $i$	Magnetic Flux, $\phi$
Resistance, $R$	Reluctance, $\mathfrak{R}$

$$\mathfrak{R} = \frac{\mathfrak{F}}{\phi} = \frac{N^2}{L} = \frac{l}{\mu A} \quad (2.2)$$

โดยที่  $l$  คือความยาวของวัตถุตามแนวของเส้นแรงแม่เหล็ก และ  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของวัตถุที่เส้นแรงแม่เหล็กไหล

ดังนั้นการรวมรีลักแตนซ์จึงสามารถรวมได้สองรูปแบบคือแบบอนุกรมและแบบขนานเหมือนกับตัวต้านทานกำหนดให้ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของแกนเหล็กในรูปที่ 2.2 มีค่าเป็นอนันต์ โดยมีช่องว่างจำนวน 2 ช่อง โดยแต่ละช่องมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กไม่เท่ากัน ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่ารีลักแตนซ์ ของช่องว่างทั้งสองช่องได้ดังนี้

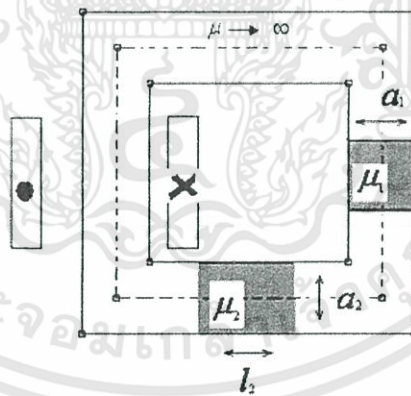
ค่ารีลักแตนซ์ของช่องว่างที่ 1 คือ

$$\mathcal{R}_1 = \frac{l_1}{\mu_1 a_1 D} \quad (2.3)$$

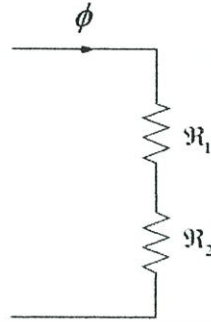
ค่ารีลักแตนซ์ของช่องว่างที่ 2 คือ

$$\mathcal{R}_2 = \frac{l_2}{\mu_2 a_2 D} \quad (2.4)$$

เนื่องจากค่ารีลักแตนซ์ทั้งสองต่ออนุกรมกันอยู่ซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมูลย์ได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 แกนเหล็กที่มีวัสดุสองชนิดวางแบบอนุกรม



รูปที่ 2.3 วงจรสมมุติที่มีค่ารีลักแตนซ์ต่ออนุกรม

ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็ก  $\phi$  สามารถคำนวณได้ดังนี้

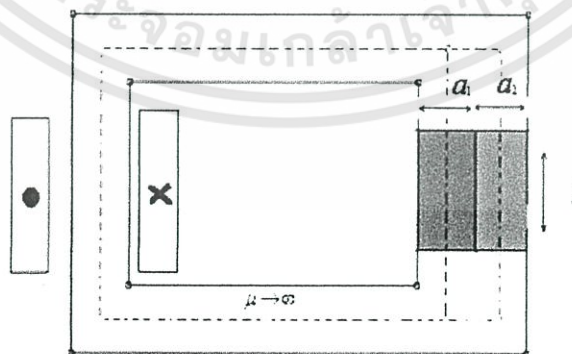
$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2} \quad (2.5)$$

และค่าความเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ

$$L = \frac{N\phi}{i} = \frac{N^2}{\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2} \quad (2.6)$$

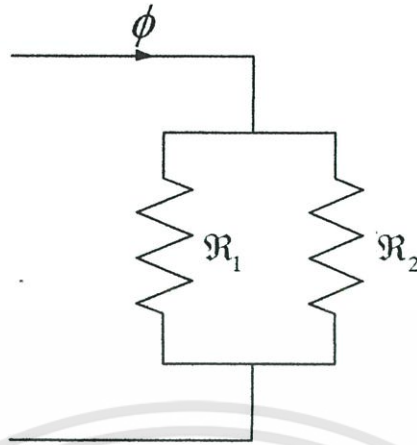
ส่วนในรูปที่ 2.4 ปรากฏว่ามีช่องว่างสองช่องขนานกันอยู่ ดังนั้นการหาค่ารีลักแตนซ์รวมจึงเป็นแบบขนาน ซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมุติได้ดังรูปที่ 2.5 โดยจะนิยามเรียกส่วนกลับของค่ารีลักแตนซ์ว่าเป็นค่า Permeance ( $\wp$ ) โดยที่

$$\wp = \frac{1}{\mathcal{R}} = \frac{\mu A}{l} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.4 แกนเหล็กที่มีวัสดุสองชนิดวางแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลที่มีค่ารีลักแตนซ์ต่อขนาน

ค่ารีลักแตนซ์ของช่องว่างที่ 1 คือ

$$\mathcal{R}_1 = \frac{l_1}{\mu_1 a_1 D} = \frac{1}{\wp_1} \quad (2.8)$$

ค่ารีลักแตนซ์ของช่องว่างที่ 2 คือ

$$\mathcal{R}_2 = \frac{l_2}{\mu_2 a_2 D} = \frac{1}{\wp_2} \quad (2.9)$$

เส้นแรงแม่เหล็กที่ได้คือ

$$\phi = \mathcal{F}(\wp_1 + \wp_2) \quad (2.10)$$

และค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้คือ

$$L = \frac{N\phi}{i} = N^2(\wp_1 + \wp_2) \quad (2.11)$$

### 2.1.2 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์

เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์มีโครงสร้างพื้นฐานที่เป็นเอกลักษณ์ดังต่อไปนี้ คือ

1. ทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์เป็นแบบขั้วยื่น (Salient Poles)
2. ที่แต่ละขั้วสเตเตอร์จะมีขดลวดพันอยู่จำนวน 1 ขดเท่านั้น และสามารถนำขดลวดที่ขั้วต่างๆ ที่เหมาะสมมาต่อเข้าด้วยกันได้ทั้งแบบอนุกรมหรือขนาน และเรียกรวมว่าขดลวดเฟส (Phase Windings)

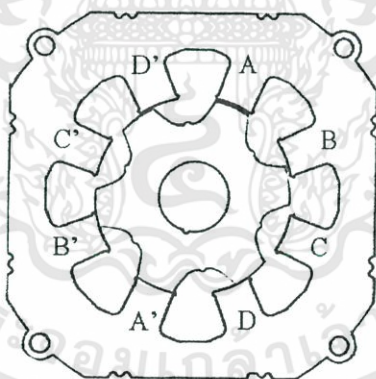
3. ขั้วของโรเตอร์ไม่ได้เป็นแม่เหล็กถาวรและไม่มีขดลวดพันอยู่

4. จำนวนขั้วของสเตเตอร์และโรเตอร์สามารถหาได้จากสมการที่ (2.12) และ (2.13)

$$N_s = 2 \times \text{phase} \times \text{polepair} \quad (2.12)$$

$$N_r = 2 \times (\text{phase} - 1) \times \text{polepair} \text{ or } 2 \times (\text{phase} + 1) \times \text{polepair} \quad (2.13)$$

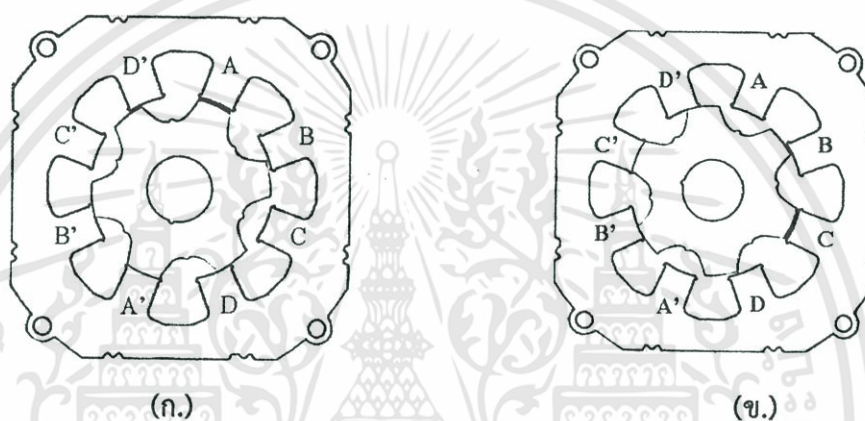
เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ที่ศึกษานั้นมี 4 เฟส แบบ 8/6 หมายถึงจำนวนขั้วของสเตเตอร์เท่ากับ 8 ขั้ว และจำนวนขั้วของโรเตอร์เท่ากับ 6 ขั้ว เป็นรุ่น RA165187 (Motion System Technology) ลักษณะโดยทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 จำนวนสเตเตอร์และโรเตอร์ แบบ 8/6

### 2.1.3 ตำแหน่ง Aligned และตำแหน่ง Unaligned

ที่ตำแหน่ง aligned นี้คือตำแหน่งที่แกนของขั้วโรเตอร์คู่ใดๆ วางอยู่ในแนวเดียวกันกับแกนของขั้วสเตเตอร์ของเฟสใดเฟสหนึ่ง ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 2.7(ก) แสดงถึงมอเตอร์ชนิด 8/6 โดยจะเห็นได้ว่าขั้วของโรเตอร์อยู่ตรงกับขั้วของสเตเตอร์ของเฟส A ณ ตำแหน่งนี้เมื่อมีกระแสไหลเข้าไปยังเฟส A แรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือโรเตอร์จะอยู่ในตำแหน่งที่มีค่าความเหนี่ยวนำสูงสุดและถ้าลองขยับโรเตอร์ไปในทิศทางด้านซ้ายหรือด้านขวาเล็กน้อยจะพบว่าโรเตอร์จะถูกดึงกลับมายังตำแหน่ง aligned นี้ แสดงว่าจุดนี้เป็นจุดสมดุลแบบมีเสถียรภาพ (Stable Equilibrium)



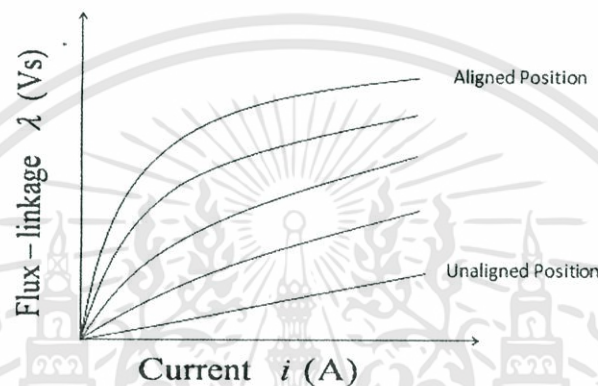
รูปที่ 2.7 (ก) SRM แบบ 8/6 ที่ตำแหน่ง Aligned (เฟส A)

(ข) SRM แบบ 8/6 ที่ตำแหน่ง Unaligned (เฟส A)

ส่วนตำแหน่ง Unaligned นี้แกนตรงกลางระหว่างขั้วของโรเตอร์ (Interpolar Axis) อยู่ตรงกับขั้วของสเตเตอร์ของเฟส A ดังรูปที่ 2.7(ข) เมื่อป้อนกระแสเข้าไปในขดลวดของเฟส A แรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และเนื่องจากความกว้างของช่องอากาศมีค่ามากที่สุด จึงทำให้ค่ารีลักแตนซ์มีค่าสูงที่สุด ส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรมีค่าต่ำที่สุด และถ้าลองขยับโรเตอร์ไปในทิศทางด้านซ้ายหรือด้านขวาเล็กน้อยจะพบว่าโรเตอร์จะเคลื่อนที่หมุนออกจากตำแหน่งนี้ และไปหยุดที่ตำแหน่ง aligned ดังนั้น ณ จุด unaligned จะเป็นจุดสมดุลแบบไม่มีเสถียรภาพ (Unstable Equilibrium)

### 2.1.4 กราฟ Magnetizing

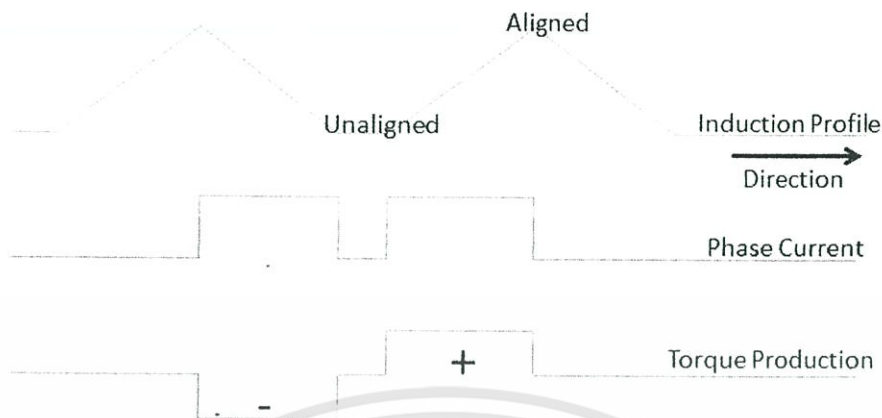
กราฟ Magnetizing คือ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำง ( $\lambda$ ) กับ กระแสในขดลวดเฟส ( $i$ ) ณ ตำแหน่งโรเตอร์ใดๆ ซึ่งตำแหน่งโรเตอร์ใดๆ ก็มีได้ตั้งแต่ตำแหน่ง Unaligned จนถึงตำแหน่ง Aligned จึงทำให้เส้นกราฟมีได้หลายเส้นตามตำแหน่งที่เปลี่ยนไป ตามแต่จะพิจารณา จึงกล่าวได้ว่า เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำงเป็นฟังก์ชันของกระแสเฟสและตำแหน่งของโรเตอร์ ( $\lambda(i, \theta)$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.8



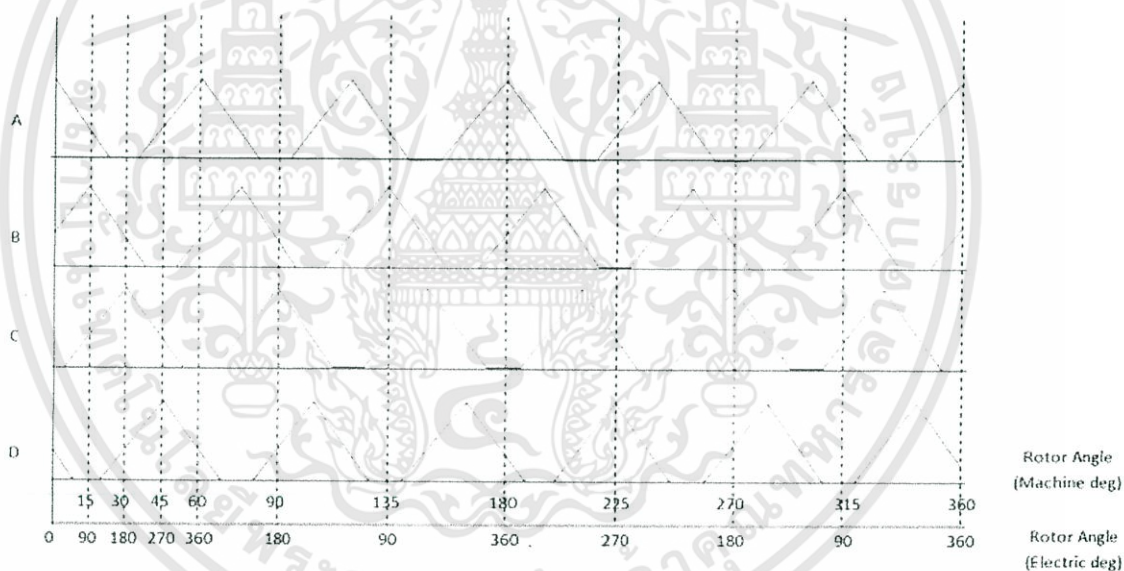
รูปที่ 2.8 กราฟ Magnetizing

### 2.1.5 แรงบิด

เมื่อเราป้อนกระแสเข้าไปในขดลวดเฟสใดขดหนึ่งจะทำให้เกิดแรงบิด ส่งผลให้โรเตอร์หมุนในทิศทางที่ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ซึ่งกล่าวง่ายๆ ก็คือ แรงบิดจะทำให้โรเตอร์หมุนเข้าหาตำแหน่ง Aligned และจะหยุดที่ค่าความเหนี่ยวนำมีค่าสูงสุด ซึ่งก็คือที่ตำแหน่ง Aligned นั่นเอง ณ จุดนี้ แรงบิดจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งโรเตอร์จะรักษาการมีสมดุลแบบมีเสถียรภาพ (Stable Equilibrium) ซึ่งเปรียบได้กับแม่เหล็กทำการดูดเหล็ก ในที่นี้แรงบิดจะเพิ่มขึ้นกับทิศทางของกระแสที่ไหลในขดลวด จากรูปที่ 2.9 ถ้าป้อนกระแสเข้าขดลวดในช่วงความชันของค่าความเหนี่ยวนำเมื่อเทียบกับตำแหน่งโรเตอร์เป็นค่าบวก จะได้แรงบิดที่มีค่าเป็นบวก (Positive Torque) แรงบิดนี้เรียกว่า แรงบิดแบบมอเตอร์ (Motoring Torque) แต่ในทางกลับกัน ถ้าป้อนกระแสเข้าขดลวดในช่วงความชันของค่าความเหนี่ยวนำเมื่อเทียบกับตำแหน่งโรเตอร์เป็นค่าลบ จะได้แรงบิดที่มีค่าเป็นลบ (Negative Torque) แรงบิดนี้จะถูกเรียกว่าแรงบิดแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generating Torque)



รูปที่ 2.9 ค่าความเหนี่ยวนำและแรงบิดเมื่อป้อนกระแสเข้าขดลวดเฟส

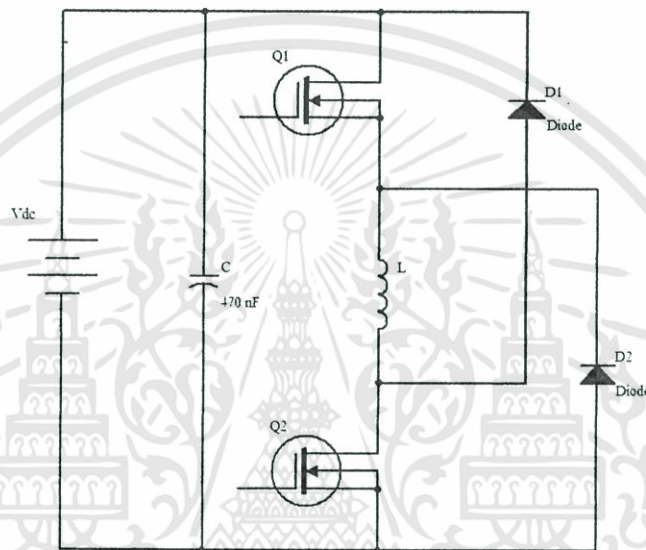


รูปที่ 2.10 ค่าความเหนี่ยวนำแต่ละเฟสของ SRM แบบ 8/6 ในการหมุน 1 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 วงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟส

วงจรชนิดนี้เป็นวงจรที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากสามารถที่จะควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดเฟสให้เป็นได้ทั้งค่าบวก ค่าศูนย์ หรือค่าลบ นั้นหมายถึงมีความสามารถที่จะควบคุมรูปร่างของกระแสเฟสได้อย่างมีประสิทธิภาพ รูปที่ 2.11 แสดงวงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟส ซึ่งวงจรจะประกอบไปด้วยสวิตช์ Q1 และ Q2 ที่ควบคุมได้ เช่น มอสเฟต หรือ ไอจีบีที และ ไดโอด D1 และ D2 เพื่อเป็นทางเดินของกระแสไหลวน



รูปที่ 2.11 วงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟส

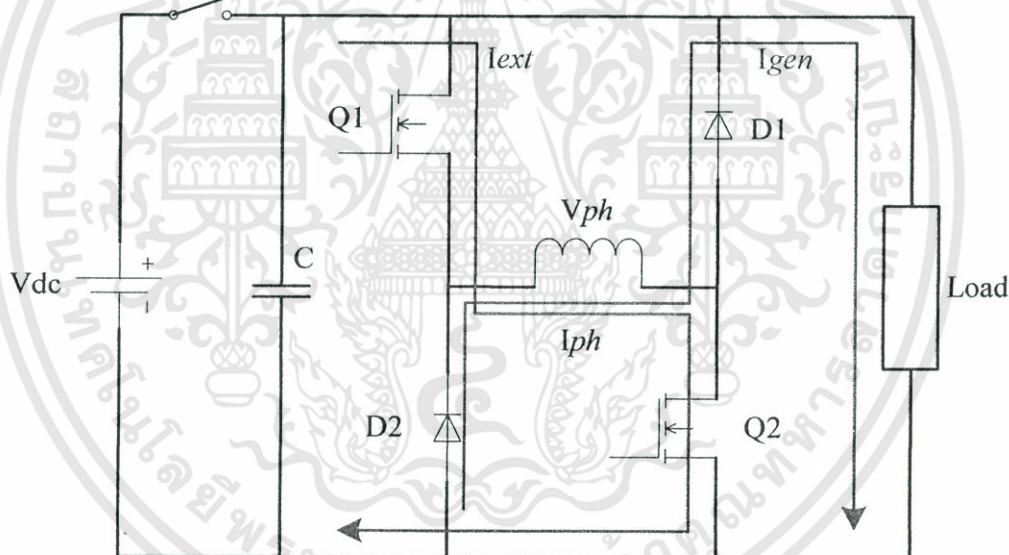
หลักการทำงานของวงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟสจะแบ่งเป็น 3 สภาวะด้วยกัน คือ ช่วงที่ 1 คือช่วงจ่ายกระแสให้กับขดลวดเฟส ช่วงที่ 2 คือช่วงคงกระแสภายในขดลวดเฟส (กระแสจะลดลงน้อยมากเปรียบเสมือนคงกระแสไว้) และช่วงที่ 3 คือช่วงที่ลดกระแสภายในขดลวดเฟสและคืนพลังงานสู่แหล่งจ่าย

ข้อดีของวงจรขับเคลื่อนชนิดนี้คือ สามารถสร้างแรงดันคร่อมขดลวดเฟสได้ทั้ง บวก ลบ และศูนย์ และเมื่อเฟสใดเฟสหนึ่งเกิดการเสียหายขึ้น มอเตอร์จะยังคงทำงานต่อไปได้ เพราะแต่ละเฟสไม่ได้มีการใช้อุปกรณ์ร่วมกัน

## 2.3 การทำงานเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG [4]

การอธิบายการทำงานเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG นั้นมีลักษณะคล้ายกันกับมอเตอร์ แต่มุม turn-on จะอยู่ก่อนจุด Aligned ส่วนมุม turn-off จะอยู่ในช่วงที่ความชันของค่าความเหนี่ยวนำเป็นลบ และทิศทางการไหลของกระแสในนั้นมี 2 ช่วงคือ ช่วงการกระตุ้นจากแหล่งจ่าย ( $I_{ext}$ ) และช่วงที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับจ่ายพลังงานคืนให้กับแหล่งจ่าย ( $I_{gen}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.12

ในการควบคุมกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG นี้สามารถควบคุมได้ 2 แบบซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กล่าวคือ ขณะทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ SRG จะทำงานในโหมดควบคุมกระแส (Current Chopping Mode) และขณะทำงานที่ความเร็วรอบสูง SRG จะทำงานในโหมดกระแสพัลส์ (Single Pulse Mode)



รูปที่ 2.12 ทิศทางการไหลของกระแสเฟสขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

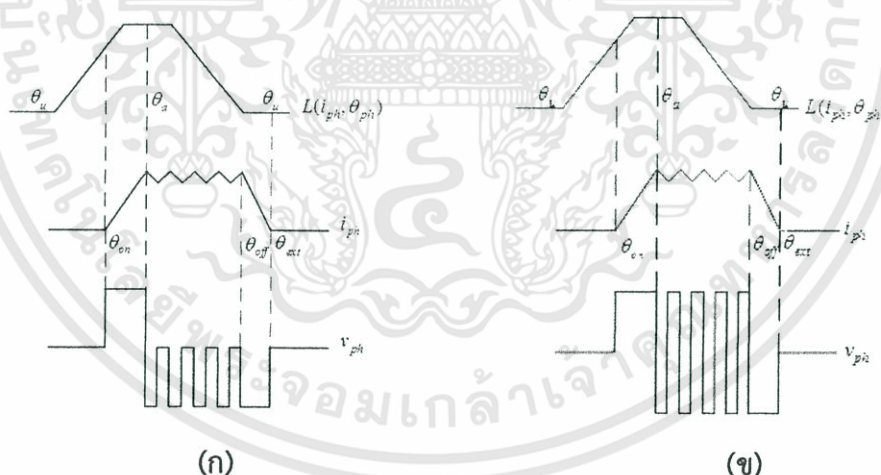
### 2.3.1 การทำงานในโหมดควบคุมกระแส

ขณะที่ SRG ทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (Base Speed) นั้นแรงดันไฟฟ้าต้านกลับยังมีค่าต่ำ ทำให้กระแสที่ไหลในขดลวดเฟสจะมีค่าสูง หากไม่มีการควบคุมจะทำให้เกิดความเสียหายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและชุดขับเคลื่อนได้ ในการควบคุมกระแสในนั้นทำได้ 2 แบบ คือ Soft Chopping และ Hard Chopping ซึ่งการทำงานในแต่ละแบบสามารถอธิบายได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) การควบคุมกระแสเฟสแบบ Soft Chopping : ในโหมดนี้ที่มุม  $\theta_{on}$  สวิตช์ Q1 และ Q2 จะ turn-on ขดลวดเฟสจะได้รับแรงดันเท่ากับดีซีบัส และกระแสเฟสจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าที่กำหนดไว้ ( $i_{max}$ ) หลังจากนั้นจะทำการ turn-off สวิตช์ Q1 และ Q2 แรงดันเฟสจะมีค่าเท่ากับลบดีซีบัส กระแสเฟสจะลดค่าให้ต่ำลง เมื่อกระแสลดลงถึงค่าต่ำสุด ( $i_{min}$ ) แล้วจะทำการ turn-on เฉพาะสวิตช์ Q1 และ D1 เพื่อให้แรงดันเฟสลดลงเป็นศูนย์ เมื่อแรงดันเฟสลดลงกระแสเฟสจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นจะ turn - off สวิตช์ Q1 และ Q2 อีกเพื่อควบคุมกระแสให้ต่ำลง จะเห็นได้ว่ารูปร่างของกระแสจะถูกควบคุมให้อยู่ในช่วงระหว่างค่าสูงสุด ( $i_{max}$ ) และค่าต่ำสุด ( $i_{min}$ ) ดังรูปที่ 2.13(ก)

2) การควบคุมกระแสเฟสแบบ Hard Chopping : ในโหมดนี้ที่มุม  $\theta_{on}$  สวิตช์ Q1 และ Q2 จะ turn-on ขดลวดเฟสจะได้รับแรงดันเท่ากับดีซีบัส และกระแสเฟสจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าที่กำหนดไว้ ( $i_{max}$ ) หลังจากนั้นจะทำการ turn-off สวิตช์ Q1 และ Q2 แรงดันเฟสจะมีค่าเท่ากับลบดีซีบัส กระแสเฟสจะลดค่าต่ำลง เมื่อกระแสลดลงถึงค่าต่ำสุด ( $i_{min}$ ) แล้วจะทำการ turn-on เฉพาะสวิตช์ Q1 และ Q2 อีกเพื่อให้แรงดันเฟสเพิ่มเป็นบวกดีซีบัส เมื่อแรงดันเฟสลดลงกระแสเฟสจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ จะเห็นได้ว่ารูปร่างของกระแสจะถูกควบคุมให้อยู่ในช่วงระหว่างค่าสูงสุด ( $i_{max}$ ) และค่าต่ำสุด ( $i_{min}$ ) ซึ่งความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเฟส เทียบกับค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟส ดังรูปที่ 2.13(ข)



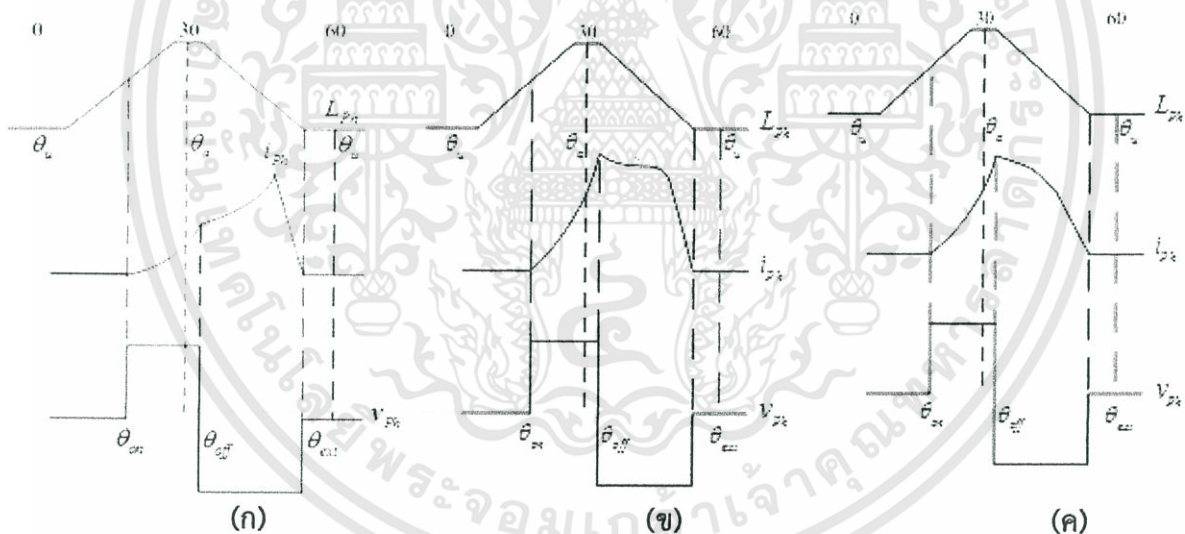
รูปที่ 2.13 (ก) ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG ในโหมด Soft Chopping

(ข) ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG ในโหมด Hard Chopping

เมื่อเปรียบเทียบการทำงานของสองโหมดที่ความถี่ในการสวิตช์เดียวกัน พบว่าการควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping นั้นจะมีกระแสกระเพื่อมสูงกว่าการควบคุมแบบ Soft Chopping มาก ดังนั้นการทำงานในโหมด Soft Chopping จะเหมาะสมกับการควบคุมกระแสในช่วงที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (Base Speed) หรือในขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (SRG) นอกจากนี้การทำงานในโหมด Soft Chopping ยังทำให้มีเสียง (Acoustic Noise) ที่น้อยกว่า

### 2.3.2 การทำงานในโหมดกระแสพัลส์

การทำงานในโหมดกระแสพัลส์นั้นค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับมีความสำคัญมาก เพราะจะมีผลกับรูปร่างของกระแส ดังรูปที่ 2.14(ก) นั้นแสดงรูปร่างของกระแสหลังจากมุม  $\theta_{off}$  ขณะที่แรงดันไฟฟ้าต้านกลับมีค่ามากกว่าแรงดันดีซีบัส ส่วนรูปที่ 2.14(ข) นั้นแสดงรูปร่างกระแสหลังจากมุม  $\theta_{off}$  โดยที่แรงดันไฟฟ้าต้านกลับมีค่าเท่ากับแรงดันดีซีบัส และในรูปที่ 2.14(ค) นั้นแสดงกระแสเฟสหลังจากมุม  $\theta_{off}$  โดยที่แรงดันไฟฟ้าต้านกลับมีค่าน้อยกว่าแรงดันดีซีบัส โดยทั่วไปการทำงานในโหมดนี้จะต้องหมุนให้เครื่องกำเนิดมีความเร็วสูงกว่าพิกัด และผลของค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่มีค่าสูงจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีประสิทธิภาพที่สูงด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.14 (ก) ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG ในโหมด Single Pulse ขณะที่แรงดันไฟฟ้าต้านกลับมากกว่าดีซีบัส

(ข) ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG ในโหมด Single Pulse ขณะที่แรงดันไฟฟ้าต้านกลับเท่ากับดีซีบัส

(ค) ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG ในโหมด Single Pulse ขณะที่แรงดันไฟฟ้าต้านกลับน้อยกว่าดีซีบัส

จากมุม  $\theta_{on}$  จนถึงมุม  $\theta_{off}$  กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นถูกส่งมาจากแหล่งจ่ายไฟ ดีซี ผ่านวงจรคอนเวอร์เตอร์ไปยังขดลวดเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และพลังงานนี้ถูกเก็บไว้ในช่องอากาศในรูปของพลังงานแม่เหล็ก (Magnetic Energy) หลังจากมุม  $\theta_{off}$  สวิตช์จะ turn-off โดยกระแสที่เรียกว่า Regenerated Current ( $I_{gen}$ ) จะไหลผ่านไดโอด D1 และ D2 เพื่อคืนพลังงานให้กับแหล่งจ่าย หรือป้อนให้กับโหลด ถ้ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นได้ (Generated Power;  $P_{gen}$ ) มากกว่าพลังงานที่กระตุ้นจากแหล่งจ่าย (Excitation Power;  $P_{ext}$ )

เราจะสามารถสรุปได้ว่า ระบบจะผลิตกำลังไฟฟ้าทั้งหมดขึ้นโดยแปลงผันจากกำลังงานกล (Mechanical Power) ไปเป็นกำลังงานทางไฟฟ้า (Electrical Power) ก็ต่อเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นได้ (Generated Power;  $P_{gen}$ ) มากกว่าพลังงานที่กระตุ้นจากแหล่งจ่าย (Excitation Power;  $P_{ext}$ ) จากรูปที่ 2.14(ข) สามารถคำนวณหากระแสเฟสในช่วงต่างๆ ได้ดังสมการที่ (2.14) และ (2.15)

$$i_{ext} = \int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} i_{ph} d\theta \quad (2.14)$$

$$i_{gen} = \int_{\theta_{off}}^{\theta_{ext}} i_{ph} d\theta \quad (2.15)$$

การคืนกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เสมือนว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดสวิตช์รีลักแตนซ์ (SRG) นี้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าตัวหนึ่ง โดยเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง หากต้องการนำไปจ่ายโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ ต้องแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรง เป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยอินเวอร์เตอร์ก่อนเสมอ

## 2.4 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของฟลายวีล [5]

การสะสมพลังงานของฟลายวีล เป็นการสะสมพลังงานในรูปของพลังงานจลน์ โดยผ่านการหมุนของก้านเพลลา ทำให้เกิดพลังงานจากแรงหมุน และเกิดการสะสมพลังงานในตัวฟลายวีล พลังงานจะสามารถปล่อยกลับคืนได้เมื่อมีความต้องการ พลังงานที่ขับฟลายวีลนั้นจะเป็นพลังงานที่ผลิตเกินกว่าการใช้งาน แทนที่จะปล่อยให้สูญเสียไปก็แปลงพลังงานนี้ไปเก็บไว้ในฟลายวีลแทน พลังงานที่สะสมไว้นี้จะสามารถนำกลับมาใช้ในช่วงที่มีความจำเป็น

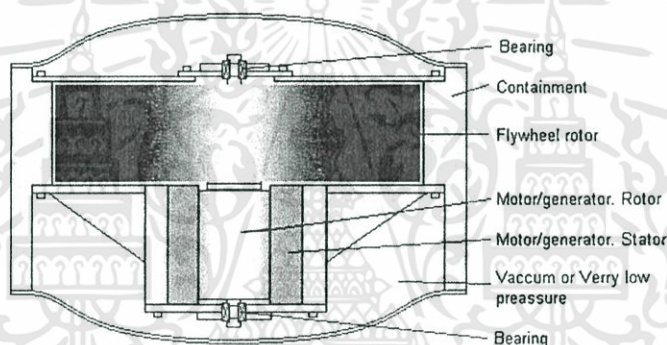
### 2.4.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของฟลายวีล

องค์ประกอบสำคัญของฟลายวีล คือ

1. แบริ่ง (Bearing) เป็นส่วนที่แขวนฟลายวีลเพื่อช่วยการทรงตัว
2. มอเตอร์ไฟฟ้า (Electric Motor), เจนเนอเรเตอร์ไฟฟ้า (Electric Generator)

ซึ่งในโครงการนี้คือเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนท์ ซึ่งสามารถจะเป็นได้ทั้งมอเตอร์หรือเจนเนอเรเตอร์โดยจะขึ้นกับมุมเฟส เมื่อเป็นมอเตอร์จะจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าไปที่ขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งจะถูกละเปลี่ยนมาเป็นแรงบิดและนำไปใช้กับโรเตอร์ทำให้หมุนเร็วขึ้นแล้วได้รับพลังงานจลน์ในโหมดเจนเนอเรเตอร์พลังงานจลน์ที่ถูกสะสมไว้ในโรเตอร์ถูกใช้เป็แรงบิดซึ่งจะถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า

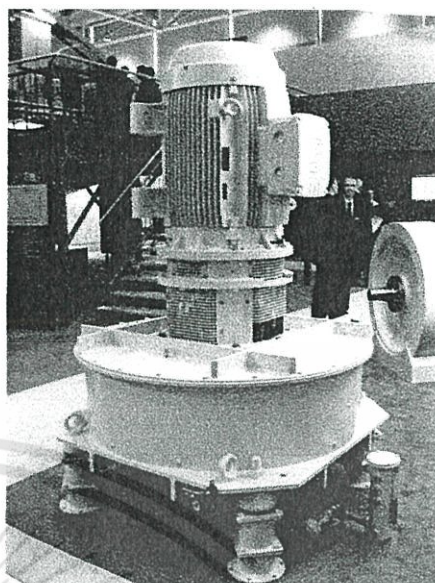
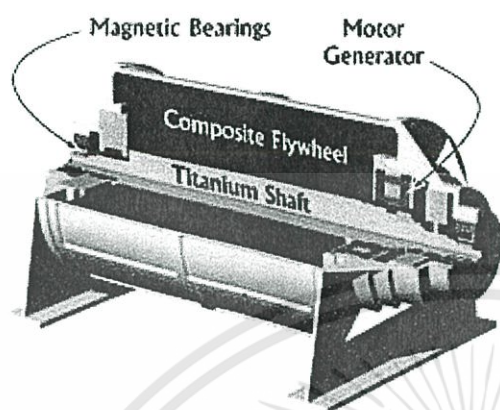
3. วงล้อพร้อมชุดก้านเพลลา (Flywheel and Shaft)



รูปที่ 2.15 โครงสร้างและส่วนประกอบของฟลายวีล [6]

### 2.4.2 ประเภทของฟลายวีล

ฟลายวีล แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามแนวแกนหมุนของเพลลาชั้วงล้อ คือ แนวแกนตั้ง (Vertical-axis) และแนวแกนนอน (Horizontal-axis) แต่เนื่องจากการหมุนในแนวแกนตั้งสามารถสร้างปริมาณพลังงานจลน์ได้มากกว่าอีกชนิดหนึ่ง จึงทำให้เกิดการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อตอบสนองความต้องการพลังงานได้มากกว่า ดังรูปที่ 2.16



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.16 ฟลายวีลในรูปแบบต่างๆ (ก) แนวแกนนอน (ข) แนวแกนตั้ง

#### 2.4.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง [7]

ฟลายวีลจะเก็บสะสมพลังงานโดยการหมุน ซึ่งจะได้ออกมาเป็นพลังงานจลน์ ที่ขึ้นกับความเฉื่อยและความเร็วการหมุน ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (2.16)$$

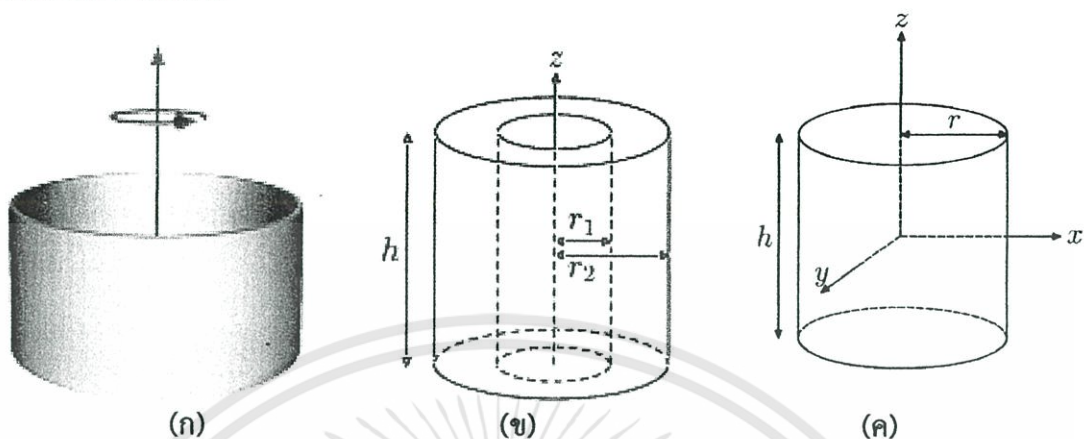
$E_k$  คือ ค่าพลังงานจลน์ที่สะสมในตัวฟลายวีล (J)

$I$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุจากจุดศูนย์กลางของการหมุน ( $\text{kg.m}^2$ )

$\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

จากสมการที่ 2.16 จะเห็นได้ว่าหากต้องการให้ความเร็วเชิงมุมมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่มีพลังงานจลน์เท่าเดิม จึงต้องลดค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุลง ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุได้จากมวลรัศมีของฟลายวีลซึ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก โดยมวลรูปทรงกระบอกที่ใช้ นั้นจะมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันออกไป

ในการคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยก็จะแตกต่างกันออกไปดังรูปที่ 2.17 ในที่นี้จะกล่าวถึงทรงกระบอก 3 แบบคือ



รูปที่ 2.17 ทรงกระบอกรูปทรงต่างๆ

(ก) ทรงกระบอกปลายเปิด

(ข) ทรงกระบอกที่มีความหนาเป็นวงแหวน

(ค) ทรงกระบอกตัน

ซึ่งจะคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกระบอกรูปทรงต่างๆ ได้ดังนี้

1. ทรงกระบอกปลายเปิด

$$I = mr^2 \quad (2.17)$$

2. ทรงกระบอกที่มีความหนาเป็นวงแหวน

$$I = \frac{1}{2}m(r_2^2 - r_1^2) \quad (2.18)$$

3. ทรงกระบอกตัน

$$I = \frac{1}{2}mr^2 \quad (2.19)$$

โดยที่  $m$  คือ มวลของทรงกระบอก (kg)

$r$  คือ รัศมีของทรงกระบอก (m)

ในโครงการนี้ได้ทำการปรับปรุงฟลายวีลที่มีลักษณะรูปทรงกระบอกตัน ให้สามารถเก็บสะสมพลังงานได้เท่าเดิม แต่เครื่องจักรกลไฟฟ้าสามารถหมุนได้ที่ความเร็วสูงกว่าเดิม ซึ่งก็คือที่ความเร็วมากกว่า 6,000 รอบต่อนาที

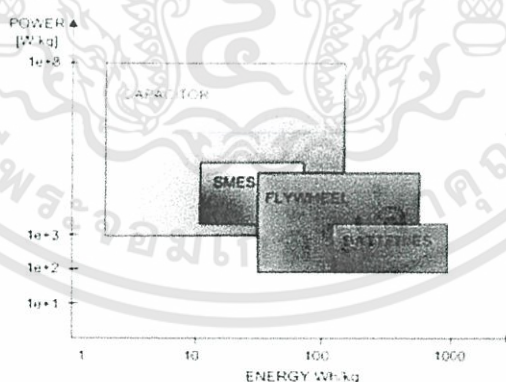
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.4 ข้อดีของระบบสะสมพลังงานโดยใช้ฟลายวีล [6]

1. มีความหนาแน่นกำลังและความหนาแน่นพลังงานสูง
2. มีความปลอดภัยจากผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่
3. สามารถวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ได้สะดวก ส่งผลให้ทราบค่าที่แน่นอนของพลังงานที่เก็บสะสมไว้ในตัวฟลายวีล
4. อายุการใช้งานยาวนานและบำรุงรักษาง่าย
5. สามารถนำพลังงานที่สะสมไว้จากการหมุนมาเป็นต้นกำลังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าในยามฉุกเฉินได้
6. วัสดุที่ใช้ในการทำฟลายวีลไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

#### 2.4.5 ข้อเสียของระบบสะสมพลังงานโดยใช้ฟลายวีล

1. มีระบบควบคุมที่ยุ่งยากและซับซ้อนกว่าระบบการสะสมพลังงานในรูปแบบอื่น
2. หากเป็นระบบสะสมพลังงานที่หมุนด้วยความเร็วต่ำ ฟลายวีลจะมีน้ำหนักมากทำให้ลำบากต่อการเคลื่อนย้าย
3. เนื่องจากฟลายวีลที่มีน้ำหนักมาก ขณะทำงานร่วมกับมอเตอร์หรือเจนเนอเรเตอร์จึงทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและเสียงดัง
4. หากน้ำหนักของฟลายวีลมากเกินไป อาจทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนต์นี้ไม่สามารถหมุนได้ถึงความเร็วพิกัด



รูปที่ 2.18 การเปรียบเทียบพลังงานที่เก็บสะสมในฟลายวีลกับแหล่งสะสมพลังงานประเภทอื่นๆ

#### 2.4.6 การพัฒนาประสิทธิภาพของระบบ

จะเห็นได้ว่า หากมวลของวัตถุเท่าเดิมและเก็บสะสมพลังงานเท่าเดิมนั้น แต่ต้องการเพิ่มความเร็วยรอบของมอเตอร์ให้สูงขึ้น แต่การทำงานในย่านความเร็วยรอบสูง นั้นอาจทำให้มีปัญหาต่างๆ ตามมา เช่น

1. มีการสูญเสียพลังงานมากขึ้น เนื่องมาจากความต้านทานอากาศ
2. เกิดความสูญเสีย (loss) มากขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานบริเวณแกนรองรับ
3. เกิดการสูญเสียพลังงานในแกนเหล็กมากขึ้น
4. อาจทำให้อุปกรณ์บางชิ้นส่วนเกิดความเสียหายได้ เนื่องจากอุปกรณ์บางอย่างมี

พิกัดและความเร็วยรอบที่แตกต่างกัน

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น จึงสามารถลดปัญหาที่จะเกิดขึ้น หากต้องการลดความต้านทานอากาศลง สามารถทำได้โดยติดตั้งระบบในปล่องสุญญากาศ ที่ความดันต่ำกว่า  $1 \mu\text{Bar}$  เพื่อกำจัดแรงเสียดทานจากอากาศและโดยแวนที่ Bearing เพื่อช่วยการทรงตัว พลังงานจลน์จะถูกถ่ายโอนเข้า-ออกในฟลายวีลด้วยเครื่องจักรไฟฟ้า ซึ่งสามารถจะเป็นได้ทั้งมอเตอร์หรือเจนเนอเรเตอร์โดยจะขึ้นกับมุมเริ่มนำกระแสของแต่ละเฟส เมื่อเป็นมอเตอร์จะจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าไปที่ขดลวดสเตเตอร์ซึ่งจะถูกแปลงมาเป็นแรงบิดและนำไปใช้กับโรเตอร์ทำให้หมุนเร็วขึ้นและได้รับพลังงานจลน์ในโหมดเจนเนอเรเตอร์พลังงานจลน์ที่ถูกสะสมไว้ในโรเตอร์จะใช้เป็นแรงบิดซึ่งจะถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มเข้าไปเป็นสิ่งจำเป็นในการควบคุมพลังงานเข้า-ออก ความเร็ว ความถี่

หากต้องการลดพลังงานที่สูญเสียในแกนเหล็กนั้น ทำได้โดยเลือกใช้วัสดุที่ทำแกนเหล็กให้เหมาะสม ซึ่งสามารถลดแรงเสียดทานบริเวณแกนรองรับได้โดยการใช้ Magnetics Bearing ซึ่ง Magnetics Bearing ไม่มีส่วนที่เชื่อมต่อกับเพลลา ไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหว จึงไม่จำเป็นต้องมีการหล่อลื่น Magnetics Bearing จะประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรซึ่งทำหน้าที่รับแรงของฟลายวีลและแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีหน้าที่ทำให้ฟลายวีลมีเสถียรภาพ ซึ่งวิธีการที่ง่ายในการสร้างเสถียรภาพคือการใช้ Mechanical Bearing ที่ปลายแกนของฟลายวีล จะทำให้แรงเสียดทานในการเคลื่อนที่ของฟลายวีลลดลง

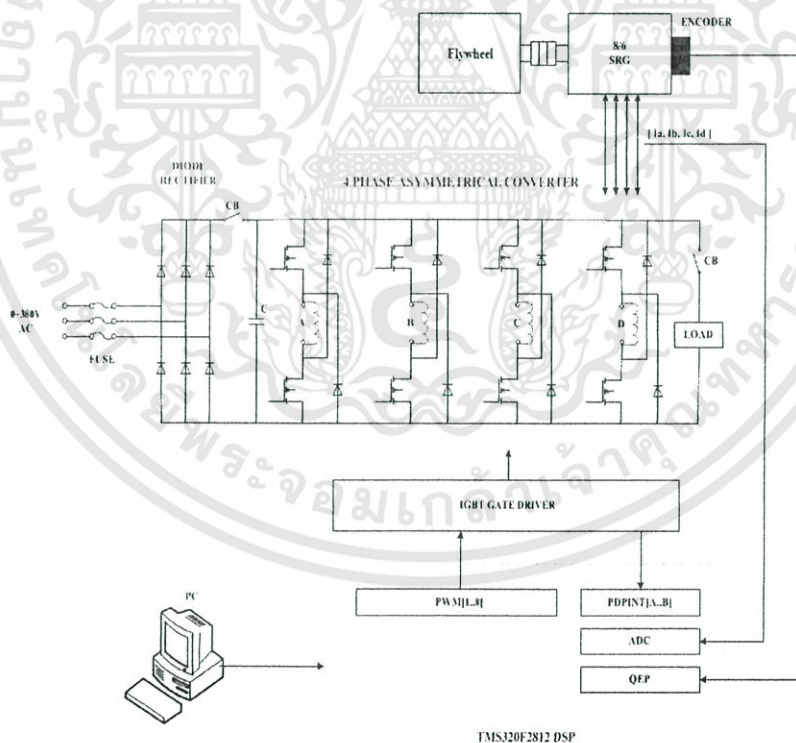
จากแนวทางการแก้ปัญหาที่กล่าวมาทั้งหมดทำได้ยาก ในโครงการนี้จึงเลือกทำการปรับปรุงฟลายวีลให้สามารถหมุนได้ที่ความเร็วสูงขึ้นแต่ยังสามารถเก็บสะสมพลังงานได้เท่าเดิม โดยการลดโมเมนต์ความเฉื่อยของฟลายวีล ซึ่งเป็นการลดความยาวรัศมีและน้ำหนักของ ฟลายวีล เพื่อให้ฟลายวีลสามารถหมุนได้เร็วขึ้น

### บทที่ 3

## การออกแบบระบบสะสมพลังงานโดยใช้ฟลายวีลและระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

### 3.1 โครงสร้างของระบบและการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

บทนี้จะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างของระบบควบคุมและวงจรกำลังสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ รวมถึงการออกแบบฟลายวีลซึ่งเป็นตัวสะสมพลังงานไฟฟ้าในรูปของพลังงานจลน์และโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ โดยโครงสร้างของระบบสะสมพลังงานโดยใช้ฟลายวีลในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ จะประกอบไปด้วยระบบควบคุมจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ซึ่งมี ชุดคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบไม่สมมาตร (Asymmetrical Converter) ชุดขับนำเกต และตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) รวมอยู่ในระบบควบคุม และระบบสะสมพลังงานโดยใช้ฟลายวีล โครงสร้างโดยรวมดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะโครงสร้างของระบบควบคุมและวงจรกำลังสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การออกแบบระบบสะสมพลังงานโดยใช้ฟลายวีล

การออกแบบฟลายวีล จะนำฟลายวีลชุดเดิมมาออกแบบใหม่เพื่อพัฒนาให้สามารถหมุนที่ความเร็วสูงกว่า 6,000 รอบต่อนาทีได้ โดยที่ฟลายวีลนั้นทำจากเหล็กเหนียว (mild steel) และมีความหนาแน่น ( $\rho$ ) เท่ากับ  $7,860 \text{ kg/m}^3$

#### 3.2.1 การหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยและพลังงานจลน์ของฟลายวีลชุดเดิม

สามารถคำนวณหามวลและหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของฟลายวีลได้ดังนี้

เมื่อฟลายวีลชุดเดิมหมุนได้ที่ความเร็ว = 4,000 รอบต่อนาที ( $418.879 \text{ rad/s}$ ), รัศมีของฟลายวีล = 0.25 เมตร, ความยาวของฟลายวีล = 0.04 เมตร,  $\rho = 7,860 \text{ kg/m}^3$

จะได้

$$m = \rho v = \rho(\pi r^2 l) = 61.732 \text{ kg}$$

$$I = \frac{1}{2} \times m r^2 = 1.929 \text{ kg.m}^2$$

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2 = 169,230 \text{ J}$$

จะเห็นได้ว่า ฟลายวีลชุดเดิมมีมวล เท่ากับ 61.732 กิโลกรัม โมเมนต์ความเฉื่อย เท่ากับ  $1.929 \text{ kg.m}^2$  และมีพลังงานจลน์ที่สะสมในตัวฟลายวีลเท่ากับ 169,230 จูล

โดยที่  $E_k$  คือ ค่าพลังงานจลน์ที่สะสมในตัวฟลายวีล (J)

$I$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุจากจุดศูนย์กลางของการหมุน ( $\text{kg.m}^2$ )

$\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุม ( $\text{rad/s}$ )

$m$  คือ มวลของทรงกระบอก (kg)

$r$  คือ รัศมีของทรงกระบอก (m)

$\sigma$ , คือ ความเครียดบริเวณของทรงกระบอก (Pa)

$\rho$  คือ ความหนาแน่นวัตถุทรงกระบอก ( $\text{kg/m}^3$ )

### 3.2.2 การออกแบบฟลายวีลชุดใหม่

จากการศึกษาต้องการให้ความเร็วรอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์มากกว่า 6,000 รอบต่อนาที ซึ่งเลือกที่ความเร็ว 6,600 รอบต่อนาที (691.1504 rad/s) แต่ต้องการให้พลังงานจลน์ที่สะสมในฟลายวีลมีค่าเท่าเดิมเท่ากับ 169,230 จูล จึงต้องลดค่าโมเมนต์ความเฉื่อยลง ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2$$

$$I = 0.7085 \text{ kg.m}^2$$

จึงสามารถออกแบบฟลายวีลชุดใหม่ได้ดังนี้

$$I = \frac{1}{2} \times m r^2$$

แทนค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่คำนวณได้

จะได้  $m r^2 = 2 \times 0.7085 \dots \dots \dots (1)$

และจาก

$$m = \rho v$$

$$= \rho (\pi r^2 l)$$

กำหนดความยาวของฟลายวีลเท่าเดิม ( $l = 0.04$  เมตร)

จะได้  $m = 7,860 \times \pi \times r^2 \times 0.04 \dots \dots \dots (2)$

จากสมการที่ (1) และ (2) พบว่า  $m = 37.4112$  กิโลกรัม  $r = 0.1946$  เมตร

ดังนั้นฟลายวีลที่ทำการออกแบบจะมีมวลเท่ากับ 37.4112 กิโลกรัม และมีรัศมีเท่ากับ 0.1946 เมตร

### 3.3 ระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีตักแทนซ์

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์และพิกัดของอุปกรณ์

อุปกรณ์	พิกัดอุปกรณ์
3 phase rectifier bridge diode	Rated Current = 45 A
4 phase asymmetrical power converter -IGBT No. CM200DY-12NF	Rated Voltage = 600 V Rated Current = 200 A
Current sensor -IC No. L08P150D15	DC Current Max. = 150 A Output Voltage = 4 V Vcc = $\pm 15$ V
Encoder R137	Rated Voltage : 5 VDC Output Waveform : Square wave ( Incremental ) Resolution : 3,600 pulse / Rev.
DSP TMS320F2812	High performance Static CMOS Technology - 150 MHz ( 6.67ns. Cycle Time ) High-Performance 32-Bit CPU On-Chip Memory Three 32- Bit CPU timers Motor Control Peripherals - Two Event Managers ( EVA, EVB ) - Two QEP Modules 12-Bit ADC, 16 Channels - 2x8 Channel Input Multiplexer - Two sample and hold - Fast conversion rate : 80ns / 12.5 MSPS Up to 56 GPIO pins

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

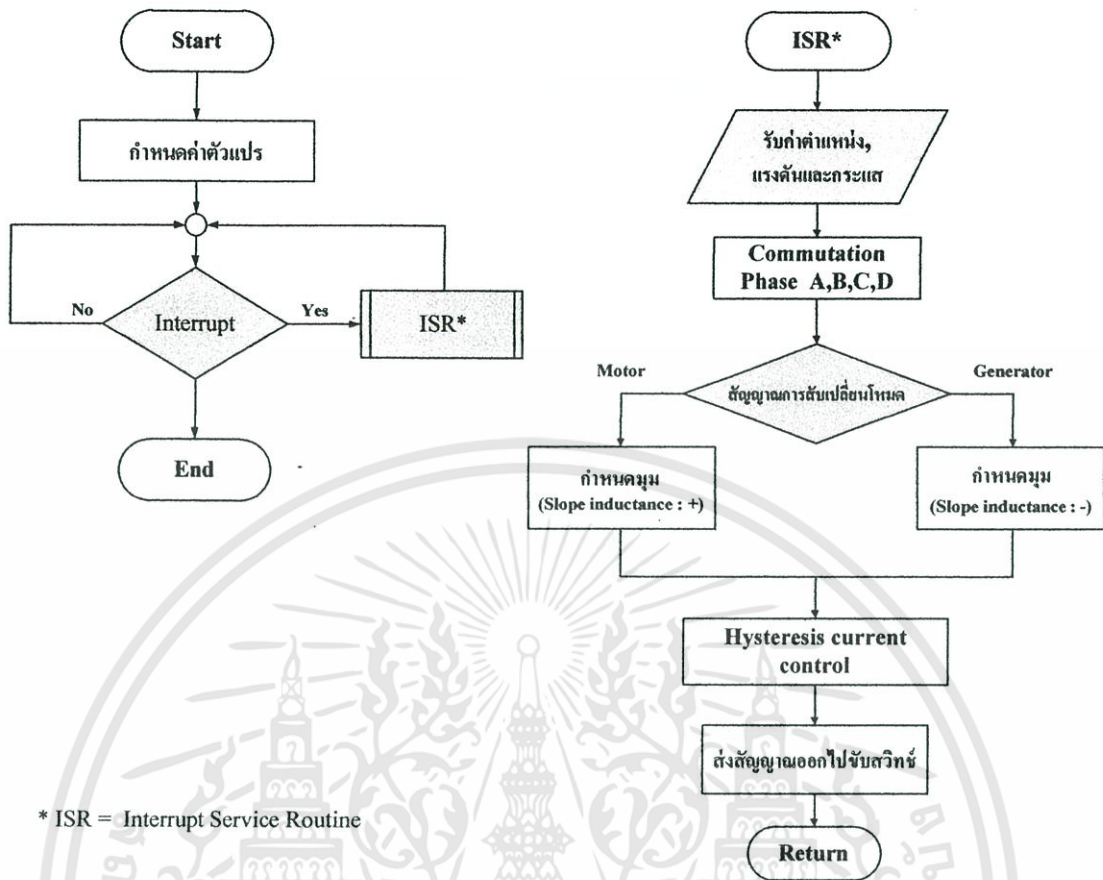
อุปกรณ์	พิกัดอุปกรณ์
3 phase Inverter No. ND 1	Power 5 kW
3 phase Induction motor	Rated Voltage 380-420 V Rated Current 7.89 A Power 4 kW Rated Speed 2875 rpm Frequency 50 Hz cos $\phi$ 0.9
SRM 4 phase 8/6 (RA165187)	Rated Voltage = 48 V Rated Power = 3 Hp. Rated Speed = 6,000 rpm. Max Speed = 12,000 rpm.
Load	Incandescent lamps = 100 W/lamp
Flywheel	radius 0.19 m width 0.04 m

### 3.4 โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

ในการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตช์รีลักแตนซ์ จะเขียนผ่านโปรแกรม Code Composer Studio (CCStudio) 3.1 ซึ่งโปรแกรมสามารถเขียนได้จากทั้งภาษา C และภาษา Assembly แต่ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ภาษา C เพราะ ภาษา C นั้นสามารถเข้าใจได้ง่ายกว่าภาษา Assembly อีกทั้งเอกสารในการค้นคว้ายังหาได้ง่ายกว่า จึงเป็นผลดีต่อนักวิจัยอื่นๆที่จะนำโปรแกรมไปพัฒนาต่อ

หลักการของโปรแกรมที่ใช้งานวิจัยนี้ เริ่มแรกจะเป็นการประกาศค่าตัวแปรต่างๆ และเริ่มการใช้งานของฟังก์ชันต่างๆที่ต้องการใช้ (เช่น ฟังก์ชัน A/D ฟังก์ชันอินเตอร์รัป) ต่อมารับคำสั่งสัญญาณการสับเปลี่ยนโหมดเพื่อกำหนดมุมจุดชนวนของการทำงานว่าเป็นมอเตอร์ หรือเจนเนอเรเตอร์ ซึ่งสามารถดูรายละเอียดการทำงานของแต่ละโหมดตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 จากนั้นจะนำค่ากระแสที่ถูกแปลงจากพอร์ต A/D มาทำการเปรียบเทียบกับค่ากระแสอ้างอิง จากนั้นโปรแกรมจะส่งสัญญาณควบคุมวงจรถับนำเกต ตามโหมดการควบคุมกระแสโหมด Single Pulse ซึ่งสามารถดูรายละเอียดการทำงานของโหมดการทำงานตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 โดยที่แผนผังของโปรแกรมสามารถดูได้ในรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนผังการทำงานของโปรแกรม

สำหรับการปรับเปลี่ยนจากโหมตมอเตอร์เป็นโหมตเจนเนอเรเตอร์จะเขียนคำสั่งรอสัญญาณจากการสับสวิตช์ ขณะทำงานเป็นโหมตเจนเนอเรเตอร์จะรักษาระดับแรงดันที่ความเร็วต่างๆ ที่มีฟลายวีลเป็นต้นกำลัง จะเริ่มจากการรับค่าแรงดันที่ถูกแปลงจากพอร์ต A/D มาทำการเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาการรักษาระดับแรงดันที่ 48 โวลต์ และคงที่มุม On โดยมีการกำหนดขอบเขตบน และขอบเขตล่างของแรงดัน หากค่าแรงดันที่รับมาได้มีค่ามากกว่าแรงดันอ้างอิงของขอบเขตบน โปรแกรมจะทำการปรับค่ามุม Off ให้น้อยลง แต่หากค่าแรงดันที่รับมาได้น้อยกว่าขอบเขตล่างของแรงดันอ้างอิง โปรแกรมจะทำการปรับค่ามุม Off ให้มากขึ้น

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบการทำงาน ซึ่งได้มาจากการทดสอบระบบควบคุม (Experimental Results) การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์และประสิทธิภาพการทำงานตอนเป็นเจนเนอเรเตอร์

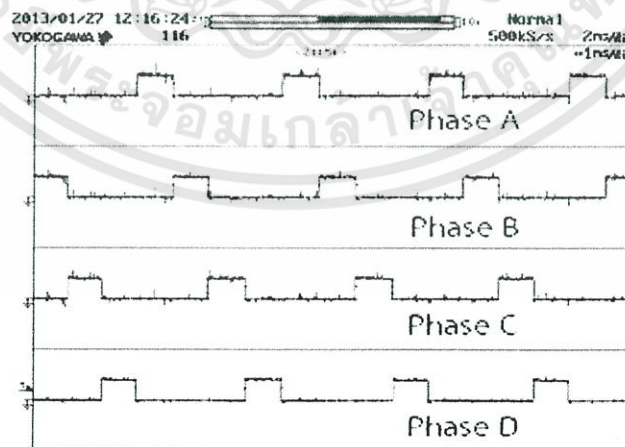
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ที่ใช้ในการทดสอบ

Number of Phase : 4	Rated Power : 2.2 kW / 3 Hp
Rated Voltage : 48 V	Phase Resistance : 15 mΩ
Base Speed : 6,000 rpm	La : 340 μH
Pole Configuration : 8/6	Lu : 62 μH

#### 4.1 วงจรควบคุมการทำงาน

##### 4.1.1 สัญญาณขับนำเกิดจาก DSP

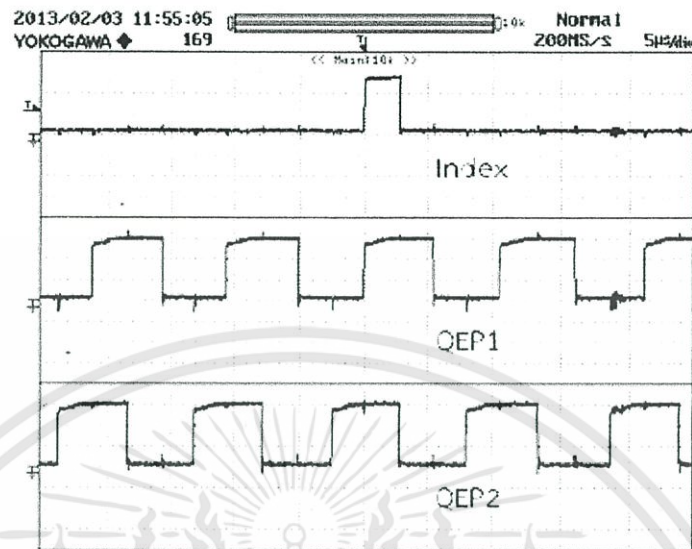
ในการทดสอบการทำงานของสัญญาณขับนำเกิดที่ได้จากตัว DSP นั้นได้ทำการวัดที่ช่อง PWM [1-8] ซึ่งแรงดันขับนำเกิดที่ออกมาจะอยู่ที่ 3.3 V ดังรูปที่ 4.1 เป็นสัญญาณขับนำเกิดของ IGBTs ตัวบน ทั้ง 4 เฟส เฟส A, เฟส B, เฟส C และ เฟส D ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 สัญญาณขับนำเกิดของ IGBT ตัวบนที่ได้จากช่อง PWM ของตัว DSP ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Single Pulse

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

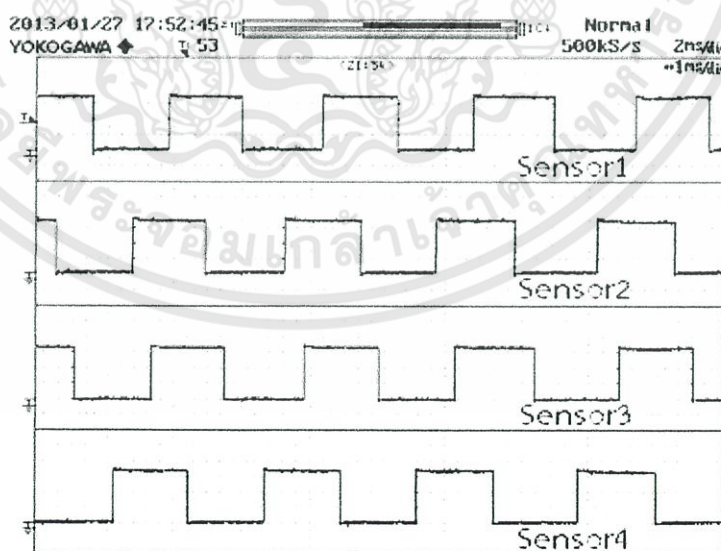
#### 4.1.2 สัญญาณจากตัว Encoder



รูปที่ 4.2 สัญญาณ QEPI (Index), QEP1 และ QEP2 ที่ได้จากตัว Encoder

สัญญาณจากตัว Encoder ดังแสดงในรูปที่ 4.2

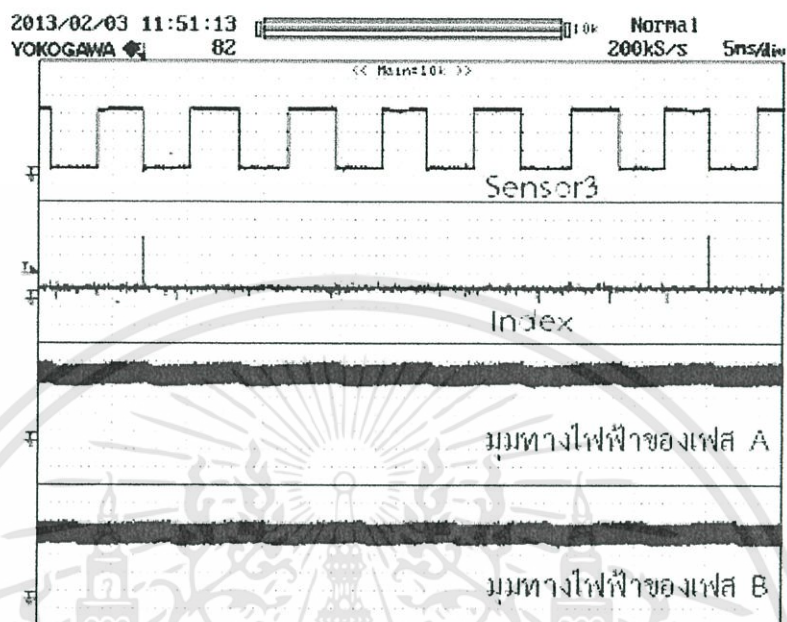
#### 4.1.3 สัญญาณจาก Sensor 4 ตัว ที่อยู่ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์



รูปที่ 4.3 สัญญาณจาก Sensor ของ SRG ทั้ง 4 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

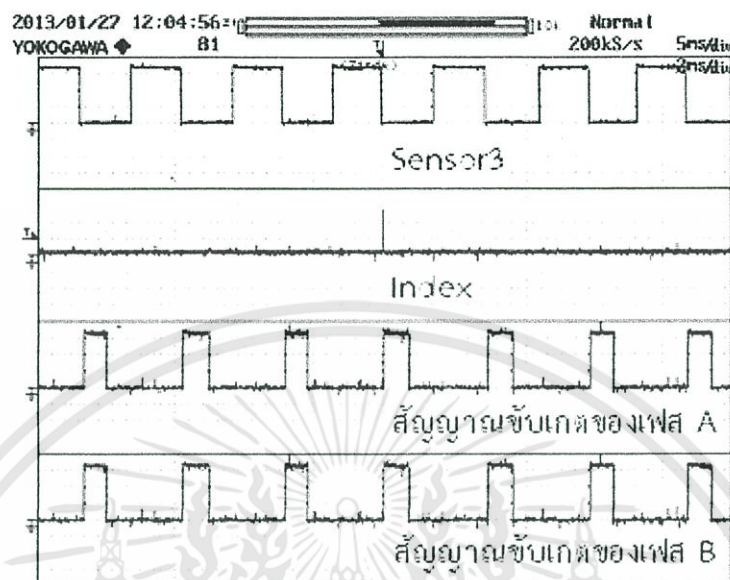
#### 4.1.4 การวัดตำแหน่งโรเตอร์ที่ได้จากวงจร DAC ของตัวประมวลผลสัญญาณ ดิจิทัล (DSP) เทียบกับ Index และ Sensor ของ SRG



รูปที่ 4.4 Sensor ของ SRG ตัวที่ 3, สัญญาณ Index, มุมทางไฟฟ้าของเฟส A และมุมทางไฟฟ้าของเฟส B

ในการคำนวณหาตำแหน่งของโรเตอร์นั้นทำได้โดยการวัดสัญญาณจากตัว Encoder ซึ่งประกอบไปด้วย QEP1, QEP2 และสัญญาณ Index (QEPI) เข้ามาที่ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) แล้วนับจำนวนพัลส์ทั้งหมดใน 1 รอบทางกลจะนับได้ 14,400 Pulse คือ 1 องศาทางกลจะนับได้ 40 Pulse จากนั้นจึงแปลงผ่านวงจร D/A เป็นมุมทางไฟฟ้าของแต่ละเฟส ดังแสดงในรูปที่ 4.4

#### 4.1.5 สัญญาณจาก Sensor ตัวที่ 3 ของ SRG, สัญญาณ Index และสัญญาณขับเคลื่อนของเฟส A



รูปที่ 4.5 สัญญาณจาก Sensor ตัวที่ 3 ของ SRG, สัญญาณ Index และสัญญาณขับเคลื่อนของเฟส A ตัวบนและเฟส B ตัวล่าง

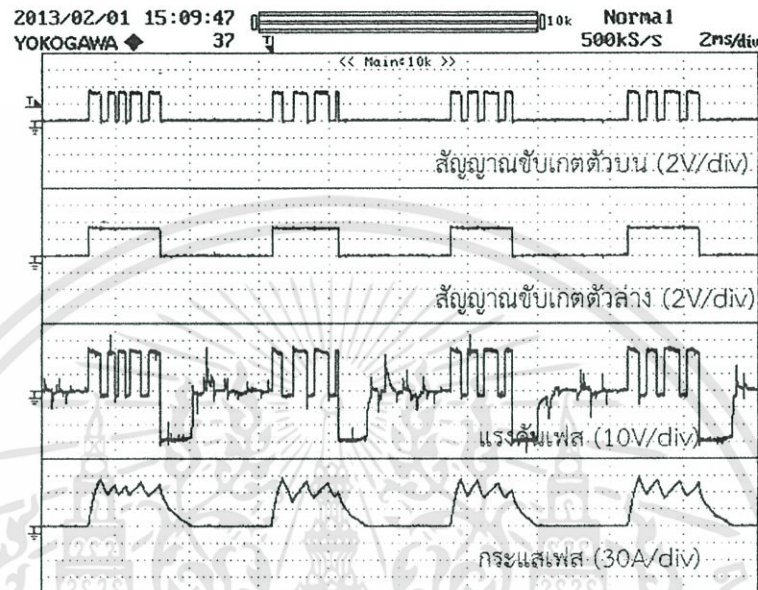
ในการตั้งค่าต้องตั้งให้ Index ตรงกับ Sensor ตัวที่ 3 ภายใน SRG เพื่อโปรแกรมจะได้คำนวณมุมในการ on และ off ของ IGBT ได้อย่างถูกต้องดังรูปที่ 4.5

#### 4.2 การทดสอบขณะที่ทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า (SRM)

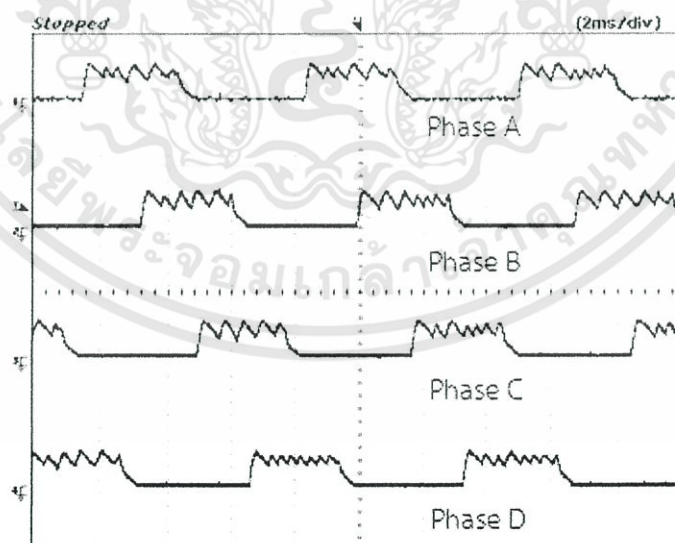
การทดสอบการทำงานของระบบขณะที่ทำงานเป็นมอเตอร์นั้น ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 3 โหมดด้วยกัน โหมดควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping, โหมดควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping และโหมดกระแสพัลส์ (Single Pulse) ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.6, 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

#### 4.2.1 ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแส แบบ Soft Chopping (Motor)

ในการทดสอบนั้นได้กำหนดให้สัญญาณขับเคลื่อนเป็นตัว Chopping ส่วนสัญญาณขับเคลื่อนทำงานเป็นแบบพัลส์ ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.6

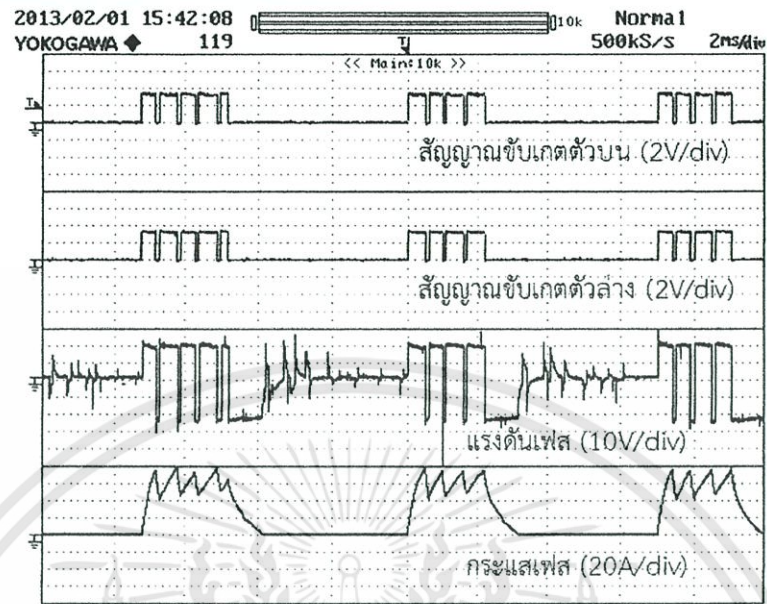


รูปที่ 4.6 สัญญาณขับเคลื่อนเฟส A ตัวบนและล่าง, แรงดันเฟส และกระแสเฟส ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping (Motor)

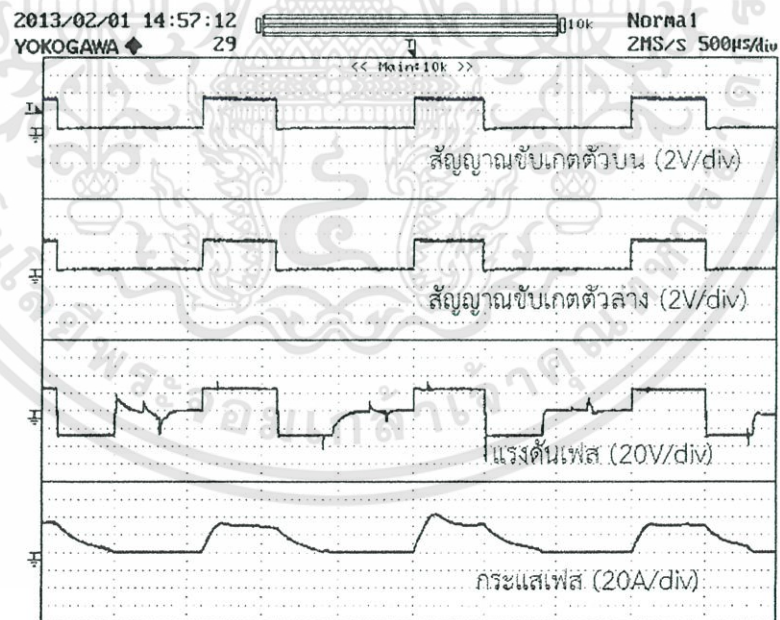


รูปที่ 4.7 กระแสขณะทำงานเป็นมอเตอร์ในโหมดควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping ทั้ง 4 เฟส (Motor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 สัญญาณขับเคลื่อนเฟส A ตัวบนและล่าง, แรงดันเฟส และกระแสเฟส ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping (Motor)



รูปที่ 4.9 สัญญาณขับเคลื่อนเฟส A ตัวบนและล่าง, แรงดันเฟส และกระแสเฟส ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Single Pulse (Motor)

#### 4.2.2 ณะที่ทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping (Motor)

ในการทดลองได้กำหนดให้สัญญาณขับสวิทช์ตัวบน และตัวล่างทำงานพร้อมกัน ซึ่งผลการทำงานแบบนี้จะทำให้กระแสเฟสของมอเตอร์เป็นแบบ Hard-chopping โดยผลที่ได้จากการทดลองการทำงานในโหมดนี้ดังแสดงดังรูปที่ 4.8

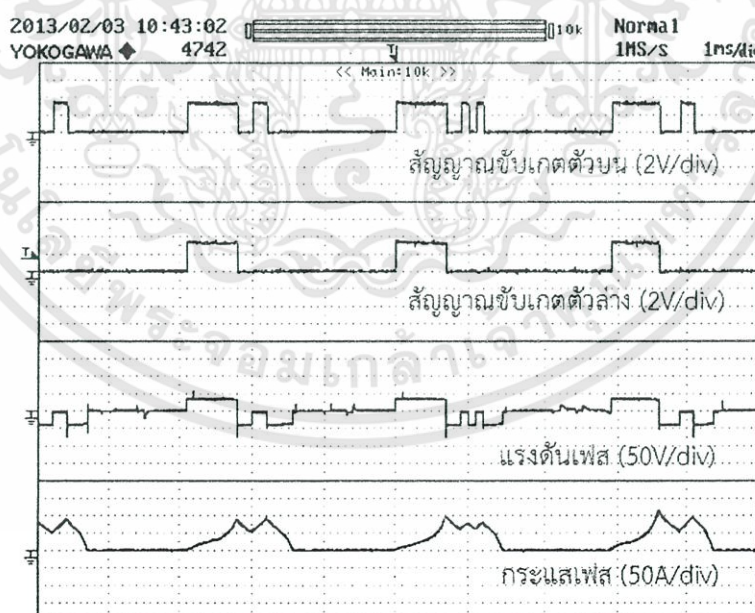
#### 4.2.3 ณะที่ทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Single Pulse (Motor)

ผลที่ได้จากการทดลองการทำงานในโหมดนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.9

### 4.3 การทดสอบณะที่ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (SRG)

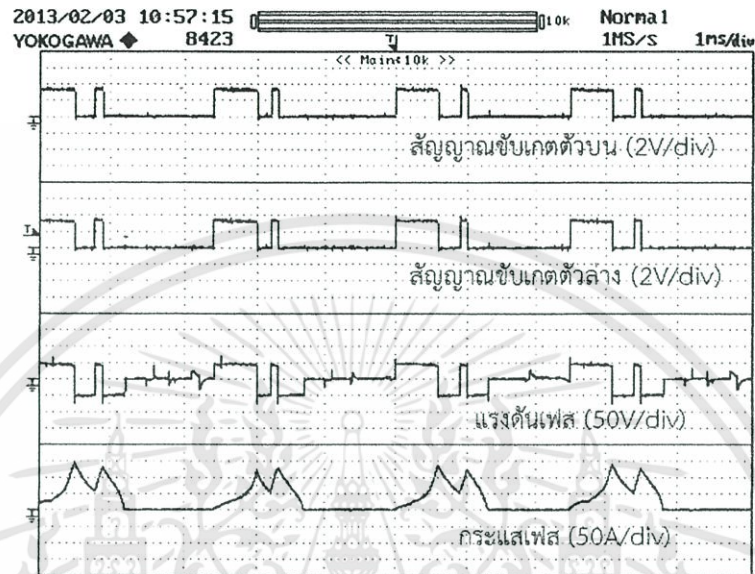
การทดสอบการควบคุมการทำงานณะที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น จะมีลักษณะเดียวกับการทำงานในโหมดมอเตอร์ ซึ่งจะมีเทคนิคการควบคุมกระแสได้ 3 แบบเช่นเดียวกับมอเตอร์ คือ Soft-chopping, Hard-chopping และ Single pulse แต่กระแสเฟสที่ได้จะต่างกับการทำงานในโหมดมอเตอร์ ซึ่งผลการทดลองที่ได้นั้นตรงตามทฤษฎีที่ได้ศึกษามา

#### 4.3.1 ณะที่ทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping (Generator)

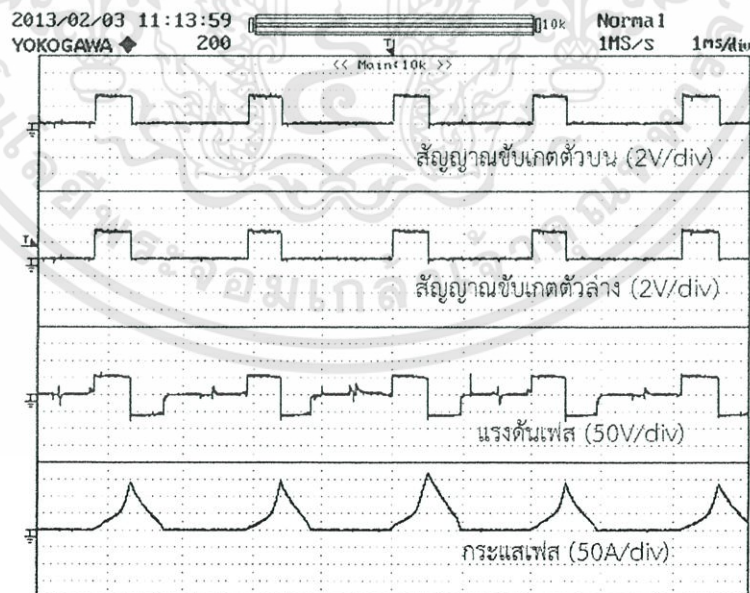


รูปที่ 4.10 สัญญาณขับเกิดเฟส A ตัวบนและล่าง, แรงดันเฟส และกระแสเฟส ณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping (Generator)

ในการทดลองนั้นได้กำหนดให้สัญญาณขับสวิทซ์ตัวล่างทำงานเป็นแบบพัลส์ แต่สัญญาณพัลส์นั้นจะมีความกว้างแคบในช่วงสั้นๆ ซึ่งต่างกับแบบมอเตอร์ที่จะให้สัญญาณพัลส์กว้างจนไปถึงมุม Off ส่วนสัญญาณตัวขับเคลื่อนจะให้เป็นตัว Chopping ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.11 สัญญาณขับเคลื่อนเฟส A ด้านบนและล่าง, แรงดันเฟส และกระแสเฟส ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping (Generator)



รูปที่ 4.12 สัญญาณขับเคลื่อนเฟส A ด้านบนและล่าง, แรงดันเฟส และกระแสเฟส ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Single Pulse (Generator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping (Generator)

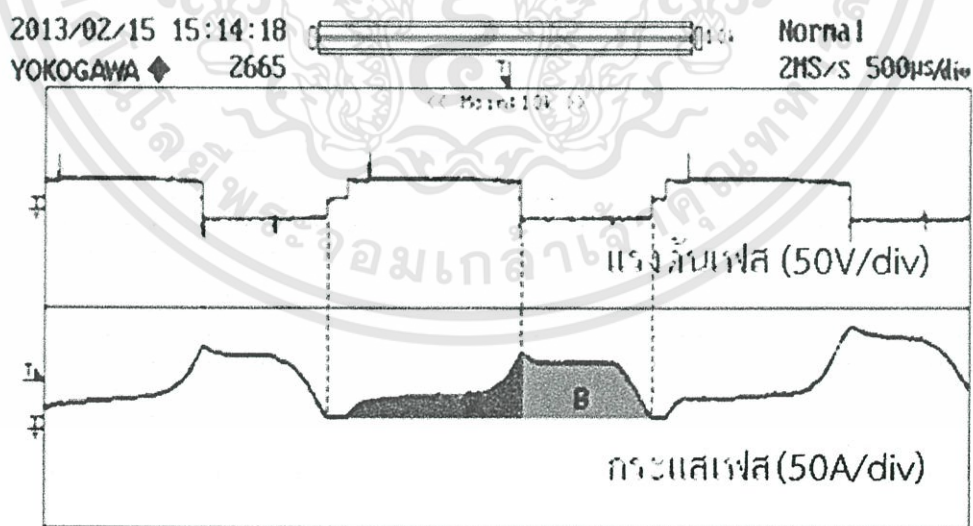
ในการทดลองได้กำหนดให้สัญญาณขับสวิตซ์ตัวบน และตัวล่างทำงานพร้อมกัน ซึ่งผลการทำงานแบบนี้จะทำให้กระแสเฟสของเจนเนอเรเตอร์เป็นแบบ Hard-chopping ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองการทำงานในโหมดนี้แสดงดังรูปที่ 4.11

#### 4.3.3 ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Single Pulse (Generator)

การทดลองในโหมดนี้จะให้สัญญาณขับเกตทั้งตัวบน และตัวล่างทำงานพร้อมกันในลักษณะพัลส์ ซึ่งส่งผลให้รูปคลื่นกระแสไม่สามารถควบคุมได้เช่นเดียวกับในโหมดมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12

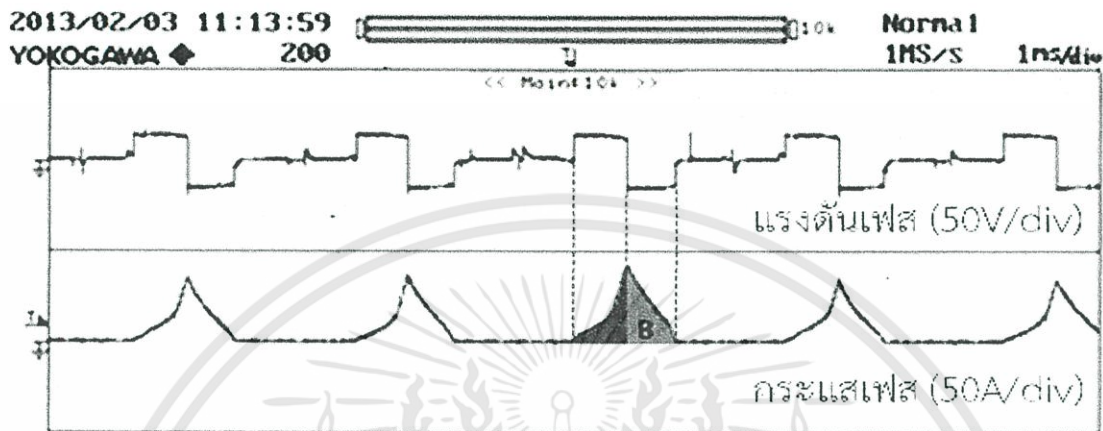
#### 4.4 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (SRG)

ขณะทำงานที่ความเร็ว 6,000 rpm มีแรงดันและกระแสในแต่ละเฟสดังรูปที่ 4.13 มีอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าผลิตได้ต่อกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าไปสร้างสนามแม่เหล็ก ดังพื้นที่ใต้กราฟ B และ A ตามลำดับ จะมีค่าเท่ากับ  $B/A = 1.35$



รูปที่ 4.13 แรงดันเฟส และ กระแสเฟส ขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความเร็ว 6,000 rpm

ขณะทำงานที่ความเร็ว 5,000 rpm มีแรงดันและกระแสในแต่ละเฟสดังรูปที่ 4.14 มีอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าผลิตได้ต่อกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าไปสร้างสนามแม่เหล็ก ดังพื้นที่ใต้กราฟ B และ A ตามลำดับ จะมีค่าเท่ากับ 1.29



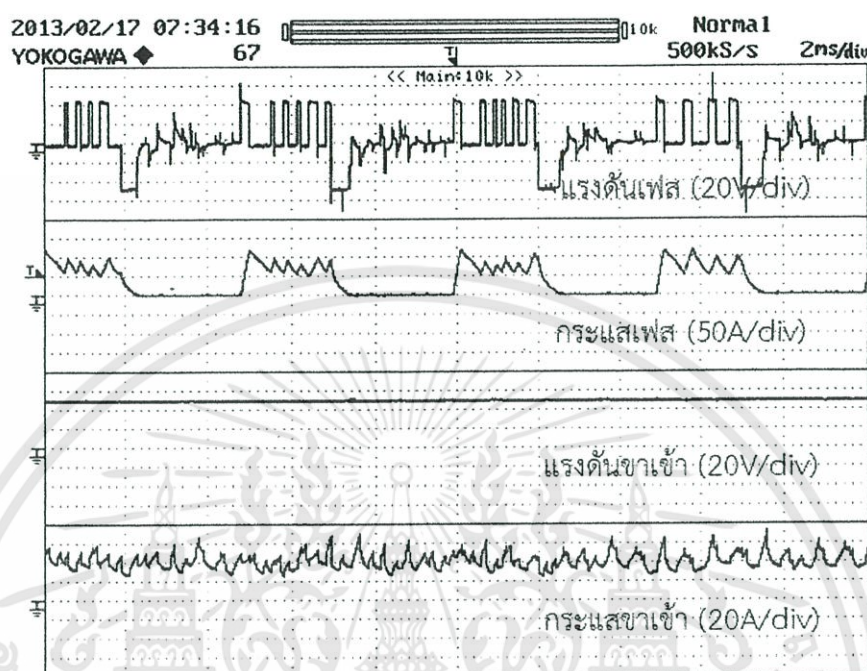
รูปที่ 4.14 สัญญาณขับเคลื่อนตัวบนและล่าง, แรงดันเฟส และกระแสเฟส ขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความเร็ว 5,000 rpm ประสิทธิภาพการเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็ว 6,000 rpm เมื่อเทียบกับที่ความเร็ว 5,000 rpm ที่ความเร็ว 6,000 rpm จะมีประสิทธิภาพมากกว่า

#### 4.5 การปรับมุมเพื่อเร่งความเร็วขณะที่ให้ SRM เป็นต้นกำลังทางกลในการหมุนฟลายวีล

เริ่มต้นกำหนดให้  $\theta_{on} = 1,300$  (มุมทางไฟฟ้า) หรือ  $32.5^\circ$  (มุมทางกล) และ  $\theta_{off} = 2,300^\circ$  (มุมทางไฟฟ้า) หรือ  $57.5^\circ$  (มุมทางกล) เมื่อถึงความเร็ว 6,000 rpm จะทำการปรับมุม  $\theta_{on} = 1,200$  (มุมทางไฟฟ้า) หรือ  $30^\circ$  (มุมทางกล) และ  $\theta_{off} = 2,200$  (มุมทางไฟฟ้า) หรือ  $55^\circ$  (มุมทางกล) เพื่อเร่งความเร็วให้มากกว่า Base Speed (6,000 rpm) เพื่อสับเปลี่ยนสภาวะการทำงานเป็นเจนเนอเรเตอร์ต่อไป

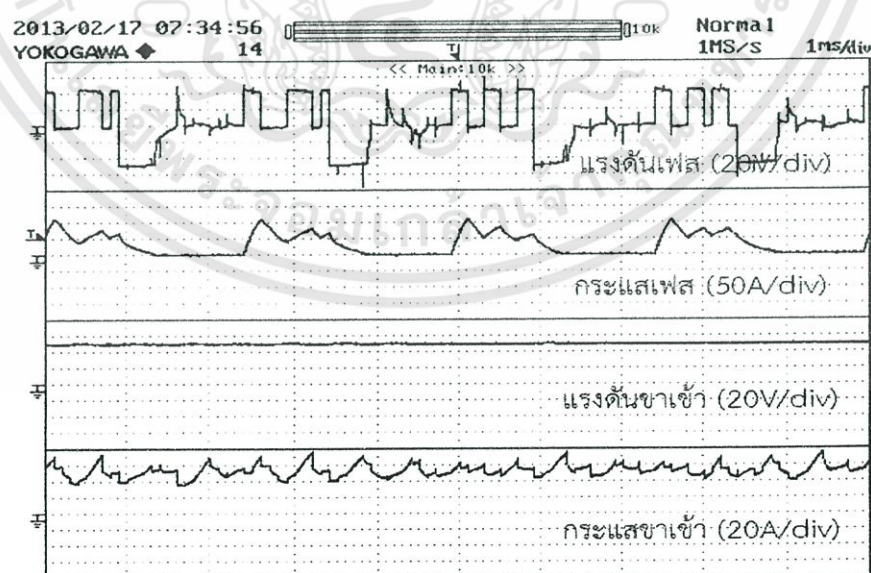
## 4.6 ผลการทดสอบขณะที่ SRM เป็นตัวต้นกำลังทางกลในการหมุนฟลายวีล

### 4.6.1 ที่ความเร็ว 2,000 rpm ในโหมด Motor



รูปที่ 4.15 แรงดันเฟส, กระแสเฟส, แรงดันขาเข้าและกระแสขาเข้า ที่ความเร็ว 2,000 rpm

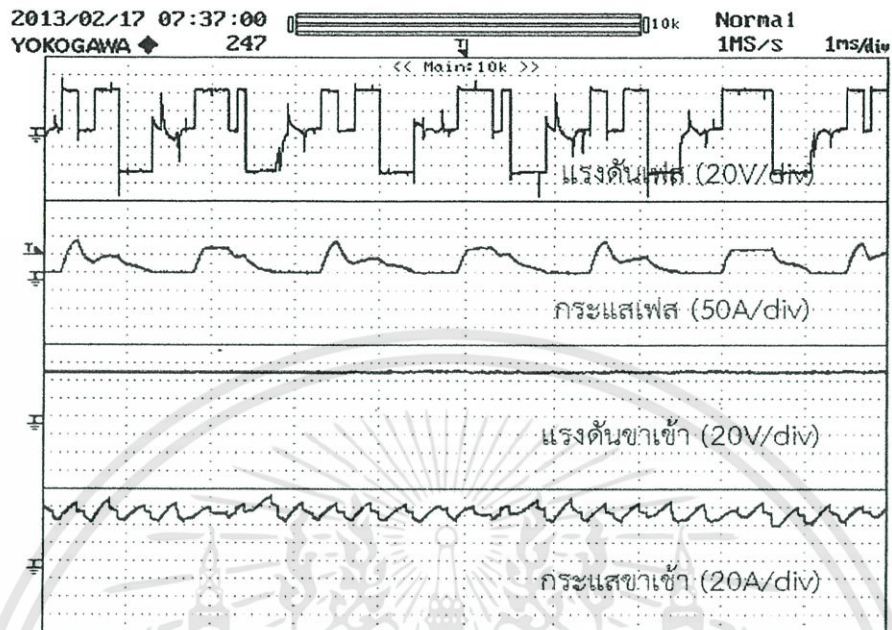
### 4.6.2 ที่ความเร็ว 4,000 rpm ในโหมด Motor



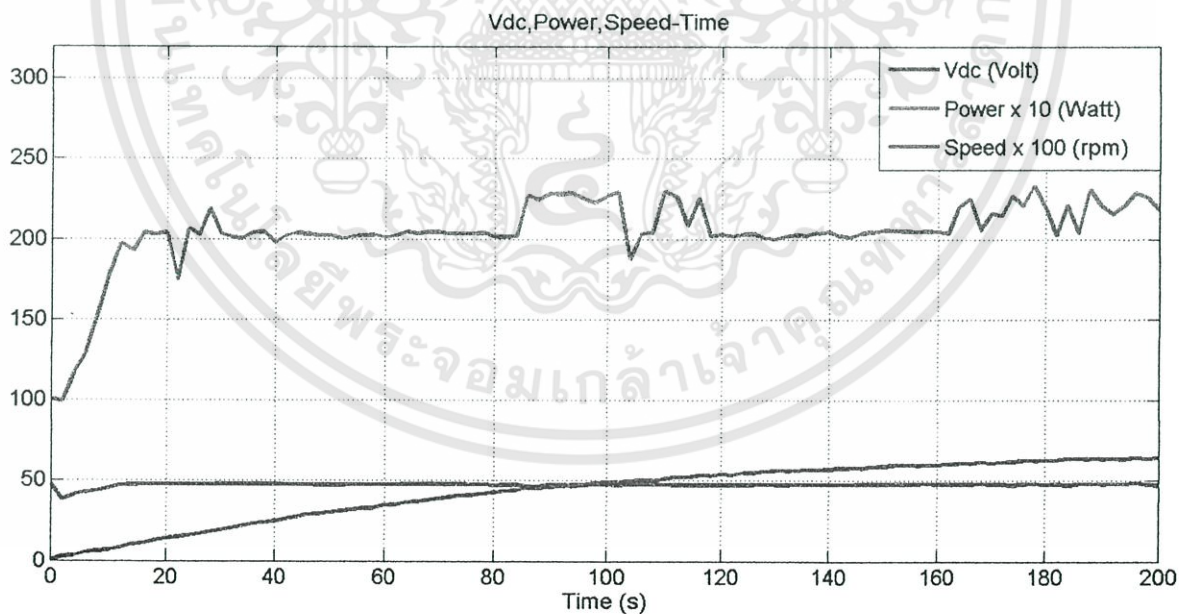
รูปที่ 4.16 แรงดันเฟส, กระแสเฟส, แรงดันขาเข้าและกระแสขาเข้า ที่ความเร็ว 4,000 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.6.3 ที่ความเร็ว 6,500 rpm ในโหมด Motor



รูปที่ 4.17 แรงดันเฟส, กระแสเฟส, แรงดันขาเข้าและกระแสขาเข้า ที่ความเร็ว 6,500 rpm



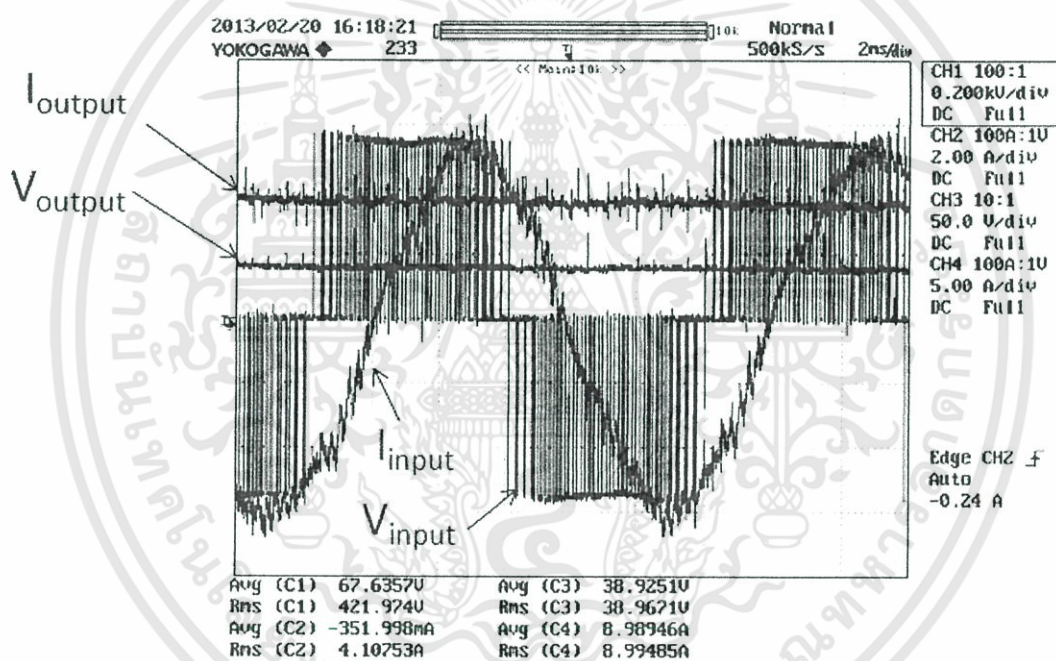
รูปที่ 4.18 แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบของ SRM เทียบกับเวลา จากความเร็ว 0 rpm ถึง 6,500 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (SRG) โดยคิดจากการวัดกำลังขาเข้าและกำลังขาออกของ SRG ที่ความเร็วและโหลดต่าง ๆ

กำหนดการทดสอบโดยวัดกำลังขาเข้า หลังอินเวอร์เตอร์ก่อนเข้าอินดักชั่นมอเตอร์ และกำลังขาออกได้จาก แรงดันไฟตรงขาออกกับกระแสตรงขาออก กำหนดให้ประสิทธิภาพของอินดักชั่นมอเตอร์เป็น 80 เปอร์เซ็นต์ โดยมุม on, off คงที่ จะคิดประสิทธิภาพได้จากสมการที่ 4.1

เมื่อจ่ายโหลดขนาด 49 หลอด (4,900 W, 220 Vac)



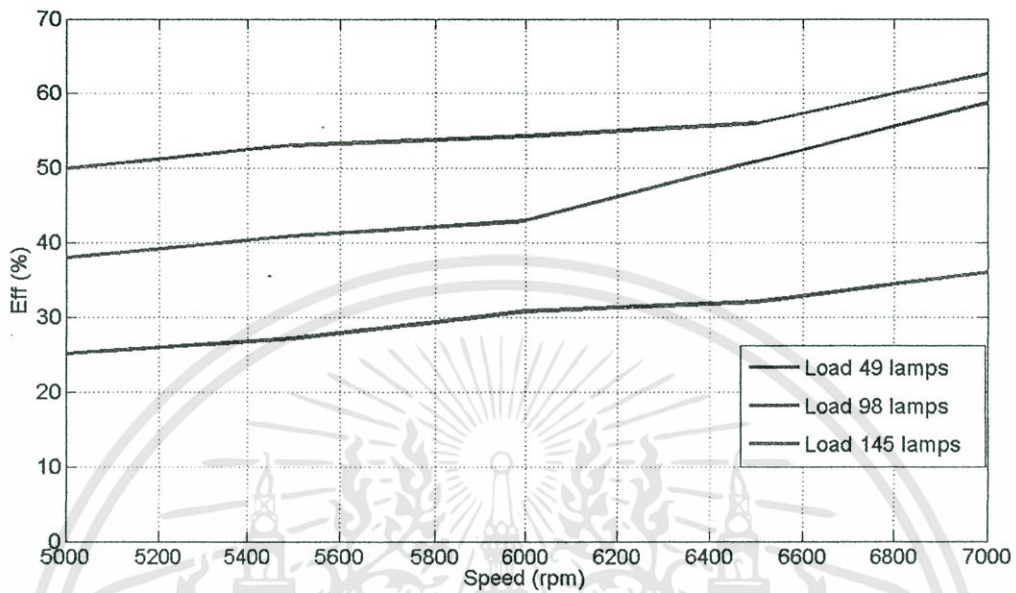
รูปที่ 4.19 แรงดันไฟฟ้าขาเข้า กระแสไฟฟ้าขาเข้า แรงดันไฟฟ้าขาออก และกระแสไฟฟ้าขาออกที่ความเร็ว 5000 rpm

โดยประสิทธิภาพจะคิดจากสมการ

$$Efficiency = \frac{P_{out,SRG}}{P_{in,SRG}} \times 100\% = \frac{V_{out} I_{out}}{(0.8)(\sqrt{3})(V_{in})(I_{in}) \cos \theta} \times 100\% \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทดสอบการจ่ายโหลดขนาด 98 หลอด (9,800 W, 220 Vac) ที่ความเร็วต่าง ๆ และทดสอบจ่ายโหลดขนาด 145 หลอด (14,500 W, 220 Vac) ที่ความเร็วต่าง ๆ



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วรอบขณะจ่ายโหลดขนาดต่าง ๆ

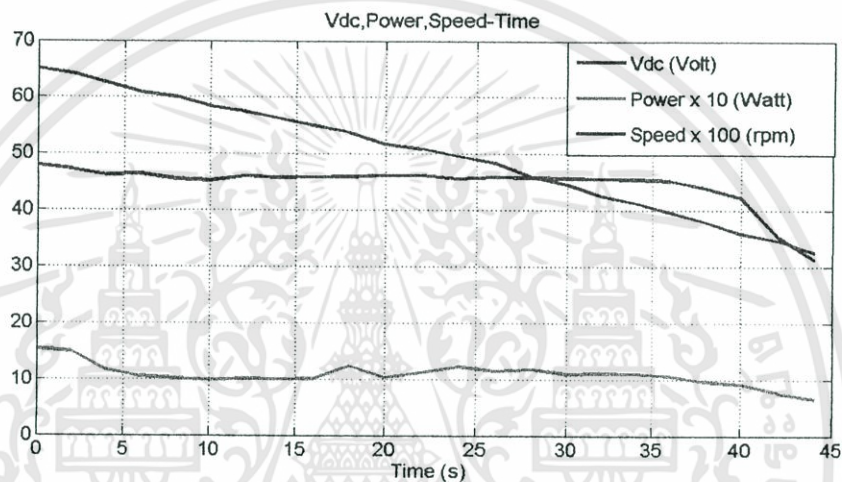
จะเห็นว่าเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นในขณะที่จ่ายโหลดคงที่ จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น และที่ความเร็วคงที่ ขณะจ่ายโหลดมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นดังรูปที่ 4.20

## 4.8 ผลการทดสอบการจ่ายโหลด โดยนำพลังงานที่เก็บสะสมจากฟลายวีลมาใช้

ผลการทดสอบการจ่ายโหลดขณะที่ความเร็ว 6,500 rpm เมื่อจ่ายโหลดขนาดต่างๆ

### 4.8.1. โหลดขนาด 150 W

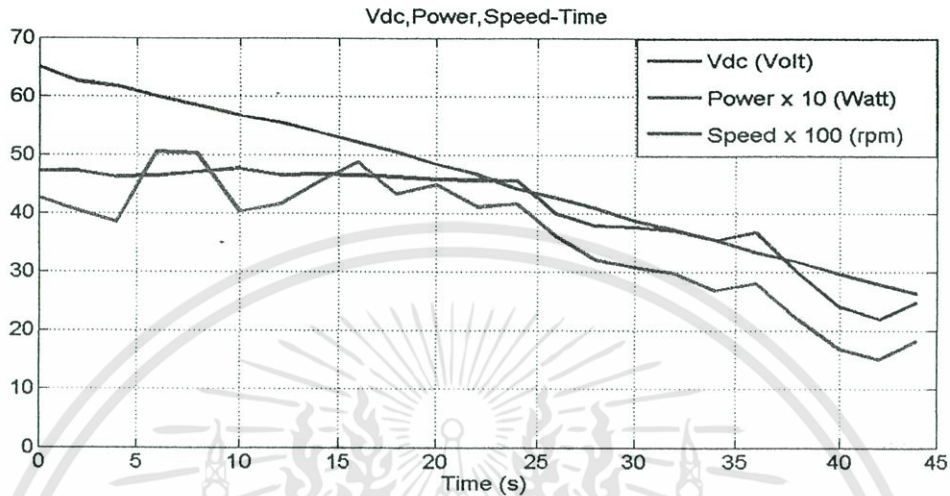
โดยพยายามคงแรงดันไฟฟ้าที่ 46 Vdc ขณะจ่ายโหลดหลอดไฟ 15 หลอด (1,500 W, 220 Vac) จะสามารถคงแรงดันไฟฟ้าได้นาน 36 วินาที ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 แรงดันไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบของ SRG เทียบกับเวลาขณะจ่ายโหลด 150W

#### 4.8.2 โหลดขนาด 425 W

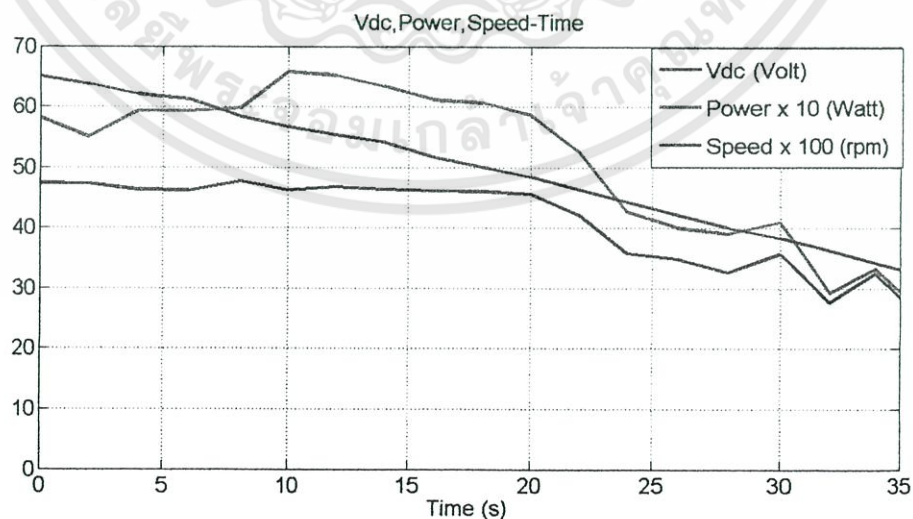
โดยพยายามคงแรงดันไฟฟ้าที่ 46 Vdc ขณะจ่ายโหลดหลอดไฟ 50 หลอด (5,000 W, 220 Vac) จะสามารถคงแรงดันไฟฟ้าได้นาน 24 วินาที ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 แรงดันไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบของ SRG เทียบกับเวลาขณะจ่ายโหลด 425W

#### 4.8.3 โหลดขนาด 580 W

โดยพยายามคงแรงดันไฟฟ้าที่ 46 Vdc ขณะจ่ายโหลดหลอดไฟ 70 หลอด (7,000 W, 220 Vac) จะสามารถคงแรงดันไฟฟ้าได้นาน 20 วินาที ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 แรงดันไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบของ SRG เทียบกับเวลาขณะจ่ายโหลด 580W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการปรับปรุงฟลายวีล และการปรับปรุงตัวโปรแกรม สามารถควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตช์รีลักแทนซีในโหมดมอเตอร์ให้เร่งความเร็วของฟลายวีลมากกว่า Base Speed (6,000 rpm) และเร่งความเร็วของฟลายวีลได้มากที่สุดจาก 0 ถึง 6,500 rpm ในเวลา 3 นาที 22 วินาที โดยคงแรงดันที่ 48 Vdc

สำหรับผลที่ได้จากการทดสอบการจ่ายโหลดที่ความเร็วต่าง ๆ และเมื่อจ่ายโหลดขนาดคงที่ จะพบว่าประสิทธิภาพที่ความเร็วต่ำนั้น จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วสูงขึ้น

สำหรับการรักษาระดับแรงดัน DC bus 48 Vdc ขณะทำงานในโหมดเจนเนอเรเตอร์ ที่ความเร็วต่างๆ หรือการจ่ายโหลดขนาดต่างๆ เมื่อความเร็วต่ำหรือจ่ายโหลดที่ขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้ช่วงเวลาที่คงที่แรงดันสั้นลง

ผลการทดสอบการจ่ายโหลดขณะที่ความเร็ว 6,500 rpm เมื่อจ่ายโหลดขนาดต่างๆ ที่จ่ายโหลดขนาด 150 W คงแรงดันไฟฟ้าที่ 46 Vdc ขณะจ่ายโหลดหลอดไฟ 15 หลอด (1,500 W, 220 Vac) จะสามารถคงแรงดันไฟฟ้าได้นาน 36 วินาที เมื่อจ่ายโหลดขนาด 425 W คงแรงดันไฟฟ้าที่ 46 Vdc ขณะจ่ายโหลดหลอดไฟ 50 หลอด (5,000 W, 220 Vac) จะสามารถคงแรงดันไฟฟ้าได้นาน 24 วินาที และ ที่จ่ายโหลดขนาด 580 W คงแรงดันไฟฟ้าที่ 46 Vdc ขณะจ่ายโหลดหลอดไฟ 70 หลอด (7,000 W, 220 Vac) จะสามารถคงแรงดันไฟฟ้าได้นาน 20 วินาที

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สามารถพัฒนาไปสู่ระบบผลิตไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อกับกริด (Grid Connected) ของการไฟฟ้าได้
2. ควรเพิ่มพิกัดอุปกรณ์เช่น ไดโอดบริดจ์ 3 เฟส เพื่อเพิ่มกระแสขาเข้าให้ใกล้เคียงกับพิกัด เพื่อเพิ่มความเร็วรอบให้มากขึ้น
3. ใช้ Superconducting Magnetic bearing จะสามารถลดความสูญเสียทางกลจากแรงเสียดทานของลูกปืนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
4. ทำเป็นระบบปิด (สุญญากาศ) เพื่อลดการสูญเสียจากแรงต้านอากาศ



## เอกสารอ้างอิง

- [1] สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา, มอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ ทฤษฎีและการออกแบบ, พิมพ์ครั้งที่ 1: กรุงเทพฯ, แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [2] T.J.E Miller, *Switched Reluctance Motors and Their Control*, NewYork:Oxford University Press, 1993.
- [3] T.J.E.Miller, *Electronic control of Switched Reluctance Machine*, Oxford:Newnes Power Engineering Series, 2001
- [4] ไพวรรณ เกิดตรวจ, “การศึกษาการแปลงผันพลังงานสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553
- [5] สรญา ยงประยูร, “ระบบสะสมพลังงาน (Energy Storage),” อาจารย์พิเศษ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมฯ มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง.
- [6] Bjorn Bölund, Hans Bernhoff and Mats Leijon, “Flywheel energy and power storage systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, pp. 235–258.
- [7] กร ขาวละเอียด, กฤตทวี วงศ์งาม และจิตติชัย เครือเทศน์, “ระบบสะสมพลังงานโดยใช้ฟลายวีลในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554.
- [8] Tomasz Siostrzonek, Stanislaw Piróg and Marcin Baszynski, “Energy Storage Systems The Flywheel Energy Storage,” *13<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2008, pp.1779-1783.
- [9] จิรายุทธ กรุดสอน, เจนณรงค์ บุญปั้นผล, ชัยนันท์ วัชรพิชิตชัย และ ณัฏฐ์ กุลประเสริฐ, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554.
- [10] ยุทธชัย ศิลปวิจารณ์, “แรงดันตกชั่วขณะกับปัญหาคุณภาพไฟฟ้า”, สาขาวิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ภาคผนวก ก โปรแกรมควบคุมการทำงานโดยใช้ DSP ด้วยภาษาซี (C-Language)

```
// FILE: MainProgram.c
// TITLE: Switched-Reluctance Machine Drive
// SPECIFICATION :
// SRG => 48V, 2.2Kw, 6000 rpm.
#####
#####
// $Release Date: August 10, 2010 : Switched Reluctance Generator Drive
#####
#####
#include "DSP281x_Device.h" // DSP281x Headerfile Include File
#include "DSP281x_Examples.h" // DSP281x Examples Include File
#include "DSP281x_Gpio.h"
#include "f281xqep.h"
#include "f281xpwmdac.h"
#include "DSP281x_Spi.h"
#include "DSP281x_Adc.h" // Local Viabile decalation
int16 check=0;
int16 CheckA=0;
int16 CheckB=0;
int16 CheckC=0;
int16 CheckD=0;
int16 CheckVdc=0;
int16 ElecTheta;
int16 MechTheta;
int16 LineEncoder;
int16 PolePairs;
int16 RawTheta;
int16 QepPpr = 3600; // QEP pulse per revolution
int16 i;
int16 j;
int16 A;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
int16 B;  
int16 C;  
int16 D;  
int16 ThetaA ;  
int16 ThetaB ;  
int16 ThetaC ;  
int16 ThetaD ;  
int16 ElecThetaA;  
int16 ElecThetaB;  
int16 ElecThetaC;  
int16 ElecThetaD;  
int16 ComA;  
int16 ComB;  
int16 ComC;  
int16 ComD;  
int16 Ia=0;  
int16 Ib=0;  
int16 Ic=0;  
int16 Id=0;  
int16 Iref;  
int16 Imax;  
int16 Imin;  
int16 Ilys;  
float Iref_actual;  
float Ilys_actual;  
int16 Va;  
int16 Vb;  
int16 Vc;  
int16 Vd;  
int16 Vdc;  
int16 Vref;  
int16 Vmax;  
int16 Vmin;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

int16 Vhys;
float  Vref_actual;
float  Vhys_actual;
int16 Gate_Drive_A;
int16 Gate_Drive_B;
int16 Gate_Drive_C;
int16 Gate_Drive_D;
int16 Gate_Drives;
int16 Gate_Drive_Lo;
int16 Gate_DriveA_Hi;
int16 Gate_DriveB_Hi;
int16 Gate_DriveC_Hi;
int16 Gate_DriveD_Hi;
int16 Gate_DriveA_Lo;
int16 Gate_DriveB_Lo;
int16 Gate_DriveC_Lo;
int16 Gate_DriveD_Lo;
int16 PwmDacCh1 = 0;
int16 PwmDacCh2 = 0;
int16 PwmDacCh3 = 0;
Uint32 DAC_Ch_A;
Uint32 DAC_Ch_B;
Uint32 DAC_Ch_C;
Uint32 DAC_Ch_D;
Uint32 DAC_Ch_E;
Uint32 DAC_Ch_F;
Uint32 DAC_Ch_G;
Uint32 DAC_Ch_H;
int16 CheckSpeed = 0;
int16 Speed1;
int16 Speed2;
int16 Speed3;
float Speed;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

int16 Speedmax = 0 ;
int16 Tune;
int16 y;
int16 s=0;
int16 x=1;      // Flag for Mode Operation ; 0 = Generator , 1 = Motor (See in Main
Program)
// Setting For SRG Drive
    int16 ThetaOn = 1800;    // SRG, ThetaOn = 0, Turn on angle at 0 Degree
(ElecTheta)
    int16 ThetaOff = 300;    // SRG, ThetaOff= 1000, Turn Off angle at 25 Degree
(ElecTheta)
    int16 ThetaOff_Reg = 300; // SRG, Turn Off angle, when DC-Bus voltage is
over
    int16 ModeGenerator = 1; // 1 = Soft Chopping , 2 = Hard Chopping
// Setting For SRM Drive
    int16 ThetaOn_SRM = 1300; // SRM, Minimum = 899
    int16 ThetaOff_SRM = 2300; // SRM Maximum = 2300
    int16 ModeMotor = 1;      // 1 = Soft Chopping , 2 = Hard Chopping
// -----
// To find maximum and minimum value of phase current
// -----
float Iref_actual = 75; // Reference Current at 150A per Phase , But Check Idc <=
Irate (40 A)
float I_hys_actual = 1; // Hysteresis Band
// -----
// To find maximum and minimum value of DC-Bus voltage
// -----
float Vref_actual = 47; // Reference Voltage at 47V
float V_hys_actual = 2; // Hysteresis Band = 2V
////////////////////////////////////
QEP qep1 = QEP_DEFAULTS;
PWMDAC pwmdac1 = PWMDAC_DEFAULTS;
// Prototype statements for functions found within this file.

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void delay_loop(void);
interrupt void adc_isr(void);
interrupt void EvaTimer2(void);
interrupt void cpu_timer0_isr(void);
interrupt void PDPINTA_ISR(void);
interrupt void PDPINTB_ISR(void);
void main(void)
{InitSysCtrl();
  EALLOW;
  GpioMuxRegs.GPAMUX.all = 0x0700; // Set GPIOA pin to primary function ( 0
= SET I/O port)
  GpioMuxRegs.GPADIR.all = 0x0FFF; // Set GPIOA pin as output function ( 1
= Output , 0 = Input )
  SysCtrlRegs.HISPCP.all = 0x3; // HSPCLK = SYSCLKOUT/6 (ADC Module)
  GpioMuxRegs.GPDMUX.bit.T1CTRIP_PDPA_GPIOD0 = 0; // Set GPIOD0 to GPIO
function
  GpioMuxRegs.GPDDIR.bit.GPIOD0 = 1; // Set GPIOD0 to output pin
  GpioMuxRegs.GPAMUX.bit.TDIRA_GPIOA11 = 0; // Set GPIOA11 to GPIO function (
check Main ISR)
  GpioMuxRegs.GPADIR.bit.GPIOA11 = 1; // Set GPIOA11 to output pin
  GpioMuxRegs.GPFMUX.bit.SPISOMIA_GPIOF1 = 0; // Set GPIOF1 to GPIO function (
check ADC ISR)
  GpioMuxRegs.GPFDIR.bit.GPIOF1 = 1 ; // Set GPIOF1 to output pin
  //GpioMuxRegs.GPBMUX.bit.CAP4Q1_GPIOB8 = 0; // Set GPIOB8 to GPIO
function
  // GpioMuxRegs.GPBDIR.bit.GPIOB8 = 0; // Set GPIOB8 to output
pin
  EDIS;
  DINT;
  InitPieCtrl();
  // -----
  // Disable CPU interrupts and clear all CPU interrupt flags:
  // -----

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

IER = 0x0000;
IFR = 0x0000;
InitPieVectTable();
// -----
// ISR functions found within this file.
// -----
EALLOW;
PieVectTable.TINT0 = &cpu_timer0_isr;
PieVectTable.CAPINT3 = &EvaTimer2;
PieVectTable.ADCINT = &adc_isr;
EDIS;
InitCpuTimers(); // For this example, only initialize the Cpu Timers
// -----
// Configure CPU-Timer 0 to interrupt every 0.1 mSec:
// 150MHz CPU Freq, 0.1mSec. Period (in uSeconds)
// -----
ConfigCpuTimer(&CpuTimer0, 150, 100); // Switching Frequency = 10 kHz.
StartCpuTimer0();
// -----
// Enable CAP3 interrupt bits for GP Timer2
// -----
EvaRegs.EVAIMRC.bit.CAP3INT = 1;
EvaRegs.EVAIFRC.bit.CAP3INT = 1;
// -----
// Set up the capture pins to primary functions
// -----
EALLOW;
GpioMuxRegs.GPAMUX.all |= 0x0700;
EDIS;
// -----
// Initialize ADC Module
// -----
InitAdc();

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

// -----
// Initialize PWMDAC Module
// -----
    pwmdac1.PeriodMax = 2500;
    pwmdac1.PwmDaclnPointer0 = &PwmDacCh1;
    pwmdac1.PwmDaclnPointer1 = &PwmDacCh2;
    pwmdac1.PwmDaclnPointer2 = &PwmDacCh3;
    pwmdac1.init(&pwmdac1);
// -----
// Initialize QEP module
// -----
    qep1.LineEncoder = QepPpr;
    qep1.init(&qep1);
// -----
// Enable ADCINT in the PIE; Group 1 interrupt 6
// -----
    PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx6 = 1;
// -----
// Enable TINT0 in the PIE: Group 1 interrupt 7
// -----
    PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx7 = 1;
// -----
// Enable PIE group 3 interrupt 7 for CAP3INT
// -----
    PieCtrlRegs.PIEIER3.all = M_INT7;
// -----
// Enable CPU INT1 which is connected to CPU-Timer 0 and INT3 for CAP3INT:
// -----
    IER |= (M_INT1 | M_INT3 | M_INT7);
// -----
// Enable global Interrupts and higher priority real-time debug events:
// -----
    EINT; // Enable Global interrupt INTM

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    ERTM; // Enable Global realtime interrupt DBGMC
// -----
// Configuration of ADC Module
// -----
AdcRegs.ADCMAXCONV.all = 0x0006; // Setup 2 conv's on SEQ1 // edit 0x0004 to
0x0005
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0x0; // Setup ADCINA0 as 1st SEQ1 conv.
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV01 = 0x1; // Setup ADCINA1 as 2nd SEQ1 conv.
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV02 = 0x2; // Setup ADCINA2 as 3rd SEQ1 conv.
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV03 = 0x3; // Setup ADCINA3 as 4th SEQ1 conv.
AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV04 = 0x4; // Setup ADCINA4 as 4th SEQ1 conv.
AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV05 = 0x5; // Setup ADCINA5 as 5th SEQ1 conv. //
edit new line
    // AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV06 = 0x6; // Setup ADCINA6 as 6th SEQ1 conv.
// edit new line tan
    AdcRegs.ADCTRL2.bit.EVA_SOC_SEQ1 = 1; // Enable EVASOC to start SEQ1
    AdcRegs.ADCTRL2.bit.INT_ENA_SEQ1 = 1; // Enable SEQ1 interrupt (every EOS)
// -----
// Assumes EVA Clock is already enabled in InitSysCtrl();
// -----
EvaRegs.T1CMPR = 750; // Setup T1 compare value
EvaRegs.T1PR = 1250; // Setup period register
EvaRegs.GPTCONA.bit.T1TOADC = 1; // Enable EVASOC in EVA
EvaRegs.T1CON.all = 0x1042; // Enable timer 1 compare (upcount mode)
// To reset QEP counter
// EvaRegs.T2CNT = 0;
// Step 6. IDLE loop. Just sit and loop forever
for(;;);
}
void delay_loop()
{
    short i;
    for (i = 1; i < 2500; i++){

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
interrupt void adc_isr(void)
{
// -----
// GpioDataRegs.GPFDAT.bit.GPIOF1 = 1;
// To check actual value of Current and DC-Bus voltage
// -----
while (AdcRegs.ADCST.bit.SEQ1_BSY == 1);
{
//la = AdcRegs.ADCRESULT0 >>4; // Changed to 12 bits value. // edit
ADCRESULT0 to ADCRESULT5
lb = AdcRegs.ADCRESULT1 >>4; // Changed to 12 bits value.
lc = AdcRegs.ADCRESULT2 >>4; // Changed to 12 bits value.
ld = AdcRegs.ADCRESULT3 >>4; // Changed to 12 bits value.
Vdc= AdcRegs.ADCRESULT4 >>4; // Changed to 12 bits value.
la = AdcRegs.ADCRESULT5 >>4;
// Tune = AdcRegs.ADCRESULT6 >>4; //tan
// -----
// Reinitialize for next ADC sequence
// -----
AdcRegs.ADCTRL2.bit.RST_SEQ1 = 1; // Reset SEQ1
AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1_CLR = 1; // Clear INT_SEQ1 bit
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1; // Acknowledge interrupt to PIE
// GpioDataRegs.GPFDAT.bit.GPIOF1 = 0; }
interrupt void cpu_timer0_isr(void)
{
//=====
=
// To check maximum range of the ISR program //
// GpioDataRegs.GPDDAT.bit.GPIOD0 = 1;
GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA11 = 1;
x = GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA12;

```

```

//=====
=
// -----
// To find maximum and minimum value of phase current
// -----
//   Iref_actual = 10;
//   Iref = (((Iref_actual*4)/150)*4095)/3; //Reference current at 1.0V [ 1365 =
4095*(1.0V/3.0V) ]
//   Ihys_actual = 0.1; // Hysteresis band
//   Ihys = (((Ihys_actual*4)/150)*4095)/3;
//   Imax = Iref + Ihys; // Maximum current ( ADCIN )
//   Imin = Iref - Ihys; // Minimum current ( ADCIN )
// -----
// To find maximum and minimum value of DC-Bus voltage
// -----
//   Vref_actual = 47; // Reference voltage at 20V
//   Vref = (Vref_actual*0.04166*4095)/3; // Compute for DSP
//   Vhys_actual = 2; // Hysteresis band = 2V
//   Vhys = (Vhys_actual*0.04166*4095)/3; // Compute for DSP
//   Vmax = Vref + Vhys; // Maximum voltage at 22V
//   Vmin = Vref - Vhys; // Minimum voltage at 18V
// -----
// Check Pulse Counts from QEP Encoder ( 4*3600 = 14400 Pulse / Rev. )
// -----
//   qep1.calc(&qep1);
//   MechTheta = EvaRegs.T2CNT; // Maximum counts = 14400
//   RawTheta = MechTheta;
// -----
// Find Commutation
// -----
//   ComputeCommutation(); // See Commutaion.c
// -----
// To find the Speed of SRM

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

// -----
    ComputeSpeed();                // See Speed.c
// -----
// Connect to DC-Bus voltage regulation module
// -----
    VoltageRegulator();           // See Vregulator.c
// -----
// Find Speed Max
// -----
    if (Speedmax < Speed)
        Speedmax = Speed ;
// -----
// For SRG control
// -----
    if(x ==0 && Speed>100)
        Generator(ModeGenerator); // See SRG.c
    else if (x==1)
        Motor(ModeMotor);
// -----
// Connected to Gate Drive Module
// -----
// Phase A
    GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA0 = Gate_DriveA_Hi;
    GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA1 = Gate_DriveA_Lo;
// Phase B
    GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA2 = Gate_DriveB_Hi;
    GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA3 = Gate_DriveB_Lo;
// Phase C
    GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA4 = Gate_DriveC_Hi;
    GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA5 = Gate_DriveC_Lo;
// Phase D
    GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA6 = Gate_DriveD_Hi;
    GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA7 = Gate_DriveD_Lo;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

// -----
// Connected input of the PWMDAC Module
// -----
    PwmDacCh1 = MechTheta;
    PwmDacCh2 = ThetaA;
    PwmDacCh3 = ThetaB;
// -----
// Call the PWMDAC update function
// -----
    pwmdac1.update(&pwmdac1);
// -----
// Acknowledge this interrupt to receive more interrupts from group 1
// -----
    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;
// -----
// End of program length check
// -----
    GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA11 = 0;
}
interrupt void EvaTimer2(void)
{
// -----
// Connect to QEP driver to update with next ISR
// -----
qep1.isr(&qep1);
// -----
// Enable more interrupts from this timer
// -----
    EvaRegs.EVAIMRC.bit.CAP3INT = 1;
    EvaRegs.EVAIFRC.all = BIT2;
// -----
// Acknowledge interrupt to receive more interrupts from PIE group 3
// -----

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

PieCtrlRegs.PIEACK.all |= PIEACK_GROUP3;
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
//      Find commutaion of 4-Phase ( A , B , C , D )
//      FILE:  Commutaion.c
/////////////////////////////////////////////////////////////////
#include "DSP281x_Device.h"
extern int16 MechTheta;
extern int16 RawTheta;
extern int16 ElecTheta;
extern int16 A;
extern int16 B;
extern int16 C;
extern int16 D;
extern int16 ThetaA;
extern int16 ThetaB;
extern int16 ThetaC;
extern int16 ThetaD;
extern int16 ComA;
extern int16 ComB;
extern int16 ComC;
extern int16 ComD;
// To find ElecTheta of Phase A
void ComputeCommutation()
{if ( MechTheta >=0 & MechTheta <=2399 )      // Angle = 60 degree => 2400
Pulse

        RawTheta = MechTheta;
else if ( MechTheta > 2399 & MechTheta <=4799 ) // Angle = 120 degree => 4800
pulse

        RawTheta = MechTheta - 2399;
else if ( MechTheta > 4799 & MechTheta <=7199 ) // Angle = 180 degree => 7200
pulse

        RawTheta = MechTheta - 4799;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

else if ( MechTheta > 7199 & MechTheta <=9599 ) // Angle = 240 degree => 9600
pulse
    RawTheta = MechTheta - 7199;
else if ( MechTheta > 9599 & MechTheta <=11999) // Angle = 300 degree => 12000
pulse
    RawTheta = MechTheta - 9599;
else if ( MechTheta >11999 & MechTheta <=14399) // Angle = 360 degree => 14400
pulse
    RawTheta = MechTheta - 11999;
////////////////////////////////////
ElecTheta = RawTheta;
// To find ElecTheta of Phase A
A = ElecTheta+660;
if (A>2399)
    ThetaA = A-2399;
else
    ThetaA = A;
// To find ElecTheta of Phase B
B = ThetaA;
B = B + 1800;
if (B > 2399)
    ThetaB = B-2399;
else
    ThetaB = B;
// To find ElecTheta of Phase C
C = ThetaB;
C = C + 1800;
if (C > 2399)
    ThetaC = C-2399;
else
    ThetaC = C;
// To find ElecTheta of Phase D
D = ThetaC;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

D = D + 1800;
if (D > 2399)
    ThetaD = D-2399;
else
    ThetaD = D;
// To find the Commutation of Phase A
ComA = ThetaA;
// To find the Commutation of Phase B
ComB = ThetaB;
// To find the Commutation of Phase C
ComC = ThetaC;
// To find the Commutation of Phase D
ComD = ThetaD;
}
// Find Speed of the SRM
// FILE: Speed.c
#include "DSP281x_Device.h"
float ComputeSpeed()
{
    extern int16 MechTheta;
    extern float Speed;
    extern int16 Speed1;
    extern int16 Speed2;
    extern int16 Speed3;
    extern int16 CheckSpeed;
    if(CheckSpeed == 0 )
    {
        Speed1 = MechTheta;
        CheckSpeed = 1;
    }
    else if(CheckSpeed ==1)
    {
        Speed2 = MechTheta;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Speed3 = Speed2-Speed1;
Speed = (Speed3*600000)/14400;
CheckSpeed = 0;
}

return Speed;
}

/////////////////////////////////////////////////////////////////
//      Control in mode Motor
//      FILE:  SRM.c
/////////////////////////////////////////////////////////////////
#include "DSP281x_Device.h"
void Motor(int Mode)
{extern int16 ThetaOn_SRM;
extern int16 ThetaOff_SRM;
extern int16 Ia;
extern int16 Ib;
extern int16 Ic;
extern int16 Id;
extern int16 lmax;
extern int16 lmin;
extern int16 CheckA;
extern int16 CheckB;
extern int16 CheckC;
extern int16 CheckD;
extern int16 ThetaOn;
extern int16 ThetaOff;
extern int16 ComA;
extern int16 ComB;
extern int16 ComC;
extern int16 ComD;
extern int16 Gate_DriveA_Hi;
extern int16 Gate_DriveB_Hi;
extern int16 Gate_DriveC_Hi;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

extern int16 Gate_DriveD_Hi;
extern int16 Gate_DriveA_Lo;
extern int16 Gate_DriveB_Lo;
extern int16 Gate_DriveC_Lo;
extern int16 Gate_DriveD_Lo;
// Increase Speed by ThetaOn_SRM & ThataOff_SRM
extern float Speed;
if ( 3000 < Speed && Speed <= 3800 )
{ ThetaOn_SRM = 899 ;
  ThetaOff_SRM = 1889 ;
// Motor
if(Mode==1)
{
// ==> For SRM control [ Soft Chopping Mode ]
if (ComA >= ThetaOn_SRM & ComA <= ThetaOff_SRM)
{if ( Ia <= Imin ) // Current Regulation of Phase A
{Gate_DriveA_Hi = 1;
Gate_DriveA_Lo = 1; }
else if( Ia >= Imax )
{Gate_DriveA_Hi = 0;
Gate_DriveA_Lo = 1; } }
else
{Gate_DriveA_Hi = 0;
Gate_DriveA_Lo = 0; }
// ==> For SRM control [ Soft Chopping Mode ]
if (ComB >= ThetaOn_SRM & ComB <= ThetaOff_SRM)
{ if ( Ib <= Imin )
{Gate_DriveB_Hi = 1;
Gate_DriveB_Lo = 1; }
else if( Ib >= Imax )
{Gate_DriveB_Hi = 0;
Gate_DriveB_Lo = 1; }}
else

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    {Gate_DriveB_Hi = 0;
    Gate_DriveB_Lo = 0;}
// ==> For SRM control [ Soft Chopping Mode ]
    if (ComC >= ThetaOn_SRM & ComC <= ThetaOff_SRM)
    {if ( Ic <= Imin )
        {Gate_DriveC_Hi = 1;
        Gate_DriveC_Lo = 1;}
        else if( Ic >= Imax )
        {Gate_DriveC_Hi = 0;
        Gate_DriveC_Lo = 1 } }
    else
    {Gate_DriveC_Hi = 0;
    Gate_DriveC_Lo = 0; }
// ==> For SRM control [ Soft Chopping Mode ]
    if (ComD >= ThetaOn_SRM & ComD <= ThetaOff_SRM)
    {if ( Id <= Imin )
        {Gate_DriveD_Hi = 1;
        Gate_DriveD_Lo = 1;}
        else if( Id >= Imax )
        {Gate_DriveD_Hi = 0;
        Gate_DriveD_Lo = 1; } }
    else
    {Gate_DriveD_Hi = 0;
    Gate_DriveD_Lo = 0; }}
else if (Mode==2)
{
// ==> For SRM control [ Hard Chopping Mode ]
    if (ComA >= ThetaOn_SRM & ComA <= ThetaOff_SRM)
    {if ( Ia <= Imin )          // Current Regulation of Phase A
        {Gate_DriveA_Hi = 1;
        Gate_DriveA_Lo = 1;   }
        else if( Ia >= Imax )
        {   Gate_DriveA_Hi = 0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        Gate_DriveA_Lo = 0; } }
else
    { Gate_DriveA_Hi = 0;
      Gate_DriveA_Lo = 0; }
// ==> For SRM control [ Hard Chopping Mode ]
if (ComB >= ThetaOn_SRM & ComB <= ThetaOff_SRM)
    { if ( Ib <= Imin )
      { Gate_DriveB_Hi = 1;
        Gate_DriveB_Lo = 1; }
      else if( Ib >= Imax )
      { Gate_DriveB_Hi = 0;
        Gate_DriveB_Lo = 0; } }
else
    { Gate_DriveB_Hi = 0;
      Gate_DriveB_Lo = 0; }
// ==> For SRM control [ Hard Chopping Mode ]
if (ComC >= ThetaOn_SRM & ComC <= ThetaOff_SRM)
    { if ( Ic <= Imin )
      { Gate_DriveC_Hi = 1;
        Gate_DriveC_Lo = 1; }
      else if( Ic >= Imax )
      { Gate_DriveC_Hi = 0;
        Gate_DriveC_Lo = 0; } }
else
    { Gate_DriveC_Hi = 0;
      Gate_DriveC_Lo = 0; }
// ==> For SRM control [ Hard Chopping Mode ]
if (ComD >= ThetaOn_SRM & ComD <= ThetaOff_SRM)
    { if ( Id <= Imin )
      { Gate_DriveD_Hi = 1;
        Gate_DriveD_Lo = 1; }
      else if( Id >= Imax )
      { Gate_DriveD_Hi = 0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        Gate_DriveD_Lo = 0; } }
else
    {   Gate_DriveD_Hi = 0;
        Gate_DriveD_Lo = 0; } }
////////////////////////////////////
//      Control in mode Generator
//      FILE:  SRG.c
////////////////////////////////////
#include "DSP281x_Device.h"
void Generator(char Mode)
{extern int16 Ia;
extern int16 Ib;
extern int16 Ic;
extern int16 Id;
extern int16 Imax;
extern int16 Imin;
extern int16 CheckA;
extern int16 CheckB;
extern int16 CheckC;
extern int16 CheckD;
extern int16 ThetaOn;
extern int16 ThetaOff;
extern int16 ComA;
extern int16 ComB;
extern int16 ComC;
extern int16 ComD;
extern int16 Gate_DriveA_Hi;
extern int16 Gate_DriveB_Hi;
extern int16 Gate_DriveC_Hi;
extern int16 Gate_DriveD_Hi;
extern int16 Gate_DriveA_Lo;
extern int16 Gate_DriveB_Lo;
extern int16 Gate_DriveC_Lo;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

extern int16 Gate_DriveD_Lo;

// -----
// Soft Chopping Phase A
// -----

if(Mode==1)
{if (ComA >= ThetaOn || ComA <= ThetaOff)
    {   if (CheckA == 0)
        {   if (Ia <= Imin )
            {   Gate_DriveA_Hi = 1;
                Gate_DriveA_Lo = 1; }
            else if (Ia >= Imax )
            {   Gate_DriveA_Hi = 0;
                Gate_DriveA_Lo = 0;
                CheckA = 1; } }
            else if (CheckA == 1) // Current Regulation of Phase A
            {   if (Ia <= Imin )
                {   Gate_DriveA_Hi = 1;
                    Gate_DriveA_Lo = 0; }
                else if (Ia >= Imax )
                {   Gate_DriveA_Hi = 0;
                    Gate_DriveA_Lo = 0; } } }
        else
        {Gate_DriveA_Hi = 0;
          Gate_DriveA_Lo = 0;
          CheckA = 0; }

// -----
// Soft Chopping Phase B
// -----

    if (ComB >= ThetaOn || ComB <= ThetaOff)
    { if (CheckB == 0)
        {   if (Ib <= Imin )
            {   Gate_DriveB_Hi = 1;
                Gate_DriveB_Lo = 1; }

```

```

else if (Ib >= Imax )
{
    Gate_DriveB_Hi = 0;
    Gate_DriveB_Lo = 0;
    CheckB = 1; }
}
else if (CheckB == 1) // Current Regulation of Phase B
{
    if (Ib <= Imin )
    {
        Gate_DriveB_Hi = 1;
        Gate_DriveB_Lo = 0; }
    else if (Ib >= Imax )
    {
        Gate_DriveB_Hi = 0;
        Gate_DriveB_Lo = 0; } } }
else
{Gate_DriveB_Hi = 0;
    Gate_DriveB_Lo = 0;
    CheckB = 0; }
// -----
// Soft Chopping Phase C
// -----
if (ComC >= ThetaOn || ComC <= ThetaOff)
{
    if (CheckC == 0)
    {
        if (Ic <= Imin )
        {
            Gate_DriveC_Hi = 1;
            Gate_DriveC_Lo = 1; }
        else if (Ic >= Imax )
        {
            Gate_DriveC_Hi = 0;
            Gate_DriveC_Lo = 0;
            CheckC = 1; } } }
else if (CheckC == 1) // Current Regulation of Phase C
{
    if (Ic <= Imin )
    {
        Gate_DriveC_Hi = 1;
        Gate_DriveC_Lo = 0; }
    else if (Ic >= Imax )

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        {      Gate_DriveC_Hi = 0;
              Gate_DriveC_Lo = 0; }      }      }

else
  {Gate_DriveC_Hi = 0;
    Gate_DriveC_Lo = 0;
    CheckC = 0;  }

// -----
// Soft Chopping Phase D
// -----

    if (ComD >= ThetaOn || ComD <= ThetaOff)
  {
    if (CheckD == 0)
    {
      if (Id <= Imin )
      {
        Gate_DriveD_Hi = 1;
        Gate_DriveD_Lo = 1; }
      else if (Id >= Imax )
      {
        Gate_DriveD_Hi = 0;
        Gate_DriveD_Lo = 0;
        CheckD = 1; }      }
      else if (CheckD == 1) // Current Regulation of
Phase D
      {
        if (Id <= Imin )
        {
          Gate_DriveD_Hi = 1;
          Gate_DriveD_Lo = 0; }
        else if (Id >= Imax )
        {
          Gate_DriveD_Hi = 0;
          Gate_DriveD_Lo = 0; }      }      }

    else
      { Gate_DriveD_Hi = 0;
        Gate_DriveD_Lo = 0;
        CheckD = 0;  }      }

else if (Mode==2) // For SRG control [ Hard Chopping Mode ]
  {
    if (ComA >= ThetaOn || ComA <= ThetaOff)
    {
      if (Ia <= Imin )

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{      Gate_DriveA_Hi = 1;
      Gate_DriveA_Lo = 1; }
else if (Ia >= Imax )
{      Gate_DriveA_Hi = 0;
      Gate_DriveA_Lo = 0; }      }
else
{ Gate_DriveA_Hi = 0;
  Gate_DriveA_Lo = 0; }
// For SRG control [ Hard Chopping Mode ]
if (ComB >= ThetaOn || ComB <= ThetaOff)
{
  if (Ib <= Imin )
  {      Gate_DriveB_Hi = 1;
        Gate_DriveB_Lo = 1; }
  else if (Ib >= Imax )
  {      Gate_DriveB_Hi = 0;
        Gate_DriveB_Lo = 0; }      }
  else
  { Gate_DriveB_Hi = 0;
    Gate_DriveB_Lo = 0; }
// For SRG control [ Hard Chopping Mode ]
if (ComC >= ThetaOn || ComC <= ThetaOff)
{
  if (Ic <= Imin )
  {      Gate_DriveC_Hi = 1;
        Gate_DriveC_Lo = 1; }
  else if (Ic >= Imax )
  {      Gate_DriveC_Hi = 0;
        Gate_DriveC_Lo = 0; }      }
  else
  { Gate_DriveC_Hi = 0;
    Gate_DriveC_Lo = 0; }
// For SRG control [ Hard Chopping Mode ]
if (ComD >= ThetaOn || ComD <= ThetaOff)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{   if (Id <= Imin )
    {   Gate_DriveD_Hi = 1;
        Gate_DriveD_Lo = 1; }
    else if (Id >= Imax )
    {   Gate_DriveD_Hi = 0;
        Gate_DriveD_Lo = 0; } }
else
{ Gate_DriveD_Hi = 0;
  Gate_DriveD_Lo = 0; } }
else if (Mode == 3) // ==> For SRG control [ Soft Chopping Mode ]
{ if (ComA >= ThetaOn & ComA <= ThetaOff)

  { if ( Ia <= Imin ) // Current Regulation of Phase A
    {   Gate_DriveA_Hi = 1;
        Gate_DriveA_Lo = 1; }
    else if ( Ia >= Imax )
    {   Gate_DriveA_Hi = 1;
        Gate_DriveA_Lo = 0; } }
    else
    {   Gate_DriveA_Hi = 0;
        Gate_DriveA_Lo = 0; }

// ==> For SRG control [ Soft Chopping Mode ]
if (ComB >= ThetaOn & ComB <= ThetaOff)
  {   if ( Ib <= Imin )
      {   Gate_DriveB_Hi = 1;
          Gate_DriveB_Lo = 1; }
      else if ( Ib >= Imax )
      {   Gate_DriveB_Hi = 1;
          Gate_DriveB_Lo = 0; } }
    else
    {   Gate_DriveB_Hi = 0;
        Gate_DriveB_Lo = 0; }

// ==> For SRG control [ Soft Chopping Mode ]

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if (ComC >= ThetaOn & ComC <= ThetaOff)
{
    if ( Ic <= Imin )
    {
        Gate_DriveC_Hi = 1;
        Gate_DriveC_Lo = 1; }
    else if( Ic >= Imax )
    {
        Gate_DriveC_Hi = 1;
        Gate_DriveC_Lo = 0; } }
else
{
    Gate_DriveC_Hi = 0;
    Gate_DriveC_Lo = 0; }
// ==> For SRG control [ Soft Chopping Mode ]
if (ComD >= ThetaOn & ComD <= ThetaOff)
{
    if ( Id <= Imin )
    {
        Gate_DriveD_Hi = 1;
        Gate_DriveD_Lo = 1; }
    else if( Id >= Imax )
    {
        Gate_DriveD_Hi = 1;
        Gate_DriveD_Lo = 0; } }
else
{
    Gate_DriveD_Hi = 0;
    Gate_DriveD_Lo = 0; } }

////////////////////////////////////
//      Voltage regulation module
//      FILE:  Vregulator.c
////////////////////////////////////
#include "DSP281x_Device.h"
extern int16 CheckVdc;
extern int16 Vdc;
extern int16 Vmax;
extern int16 Vmin;
extern int16 ThetaOff;
extern int16 ThetaOff_Reg;
extern int16 ThetaOn_Reg;

```

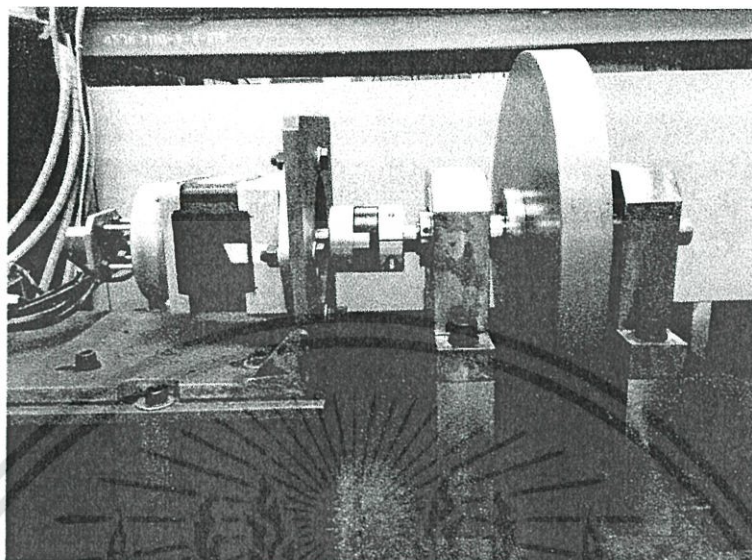
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

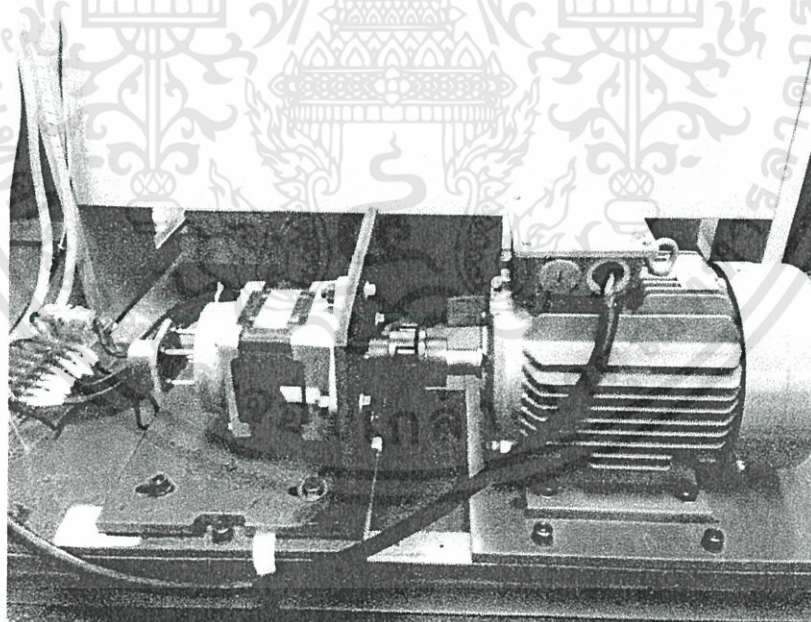
extern int16 ThetaOn;
extern int16 x;
void VoltageRegulator()
{ if(x==0)
  {   if (CheckVdc == 0)
      {   if (Vdc <= Vmin)
          ThetaOff = ThetaOff_Reg;
        else if (Vdc >= Vmax)
          {   ThetaOff = ThetaOff - 5;
              CheckVdc = 1; }
            else
              ThetaOff = ThetaOff; }
        else if (CheckVdc == 1)
          {   if (Vdc >= Vmax)
              { if (ThetaOff >= 100) // If ThetaOff is more than 100.It will not be
reduced.
              ThetaOff = ThetaOff-5;
              else
                ThetaOff = ThetaOff; }
            else if (Vdc <= Vmin)
              { if (ThetaOff <= 1000) // If ThetaOff is less than 1000.It will not be
added.
              ThetaOff = ThetaOff+5;
              else
                ThetaOff = ThetaOff; }
            else
              ThetaOff = ThetaOff;
          if (Vdc < 100) CheckVdc = 0; } } }

```

ภาคผนวก ข ชุดวิจัยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์, อินดักชันมอเตอร์ และฟลายวีล

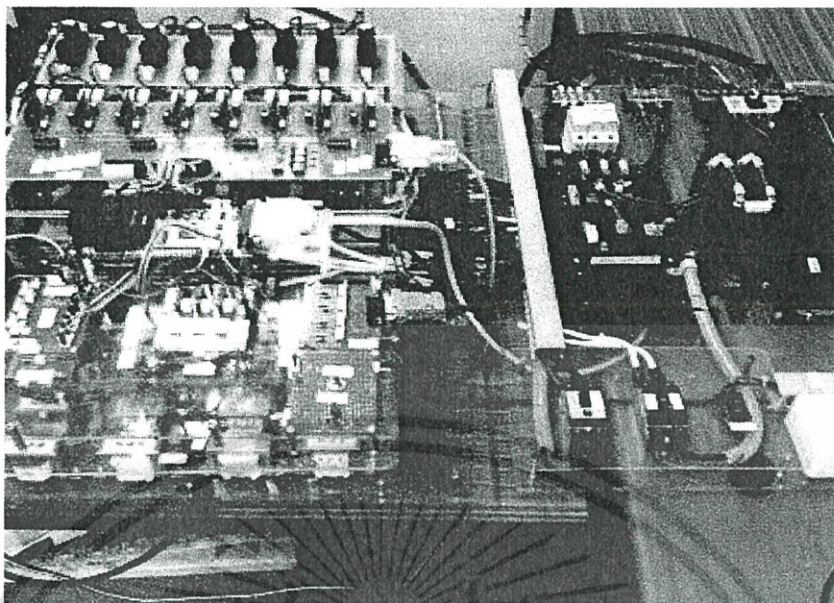


รูปที่ ข.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ (ซ้าย), ฟลายวีล (ขวา)

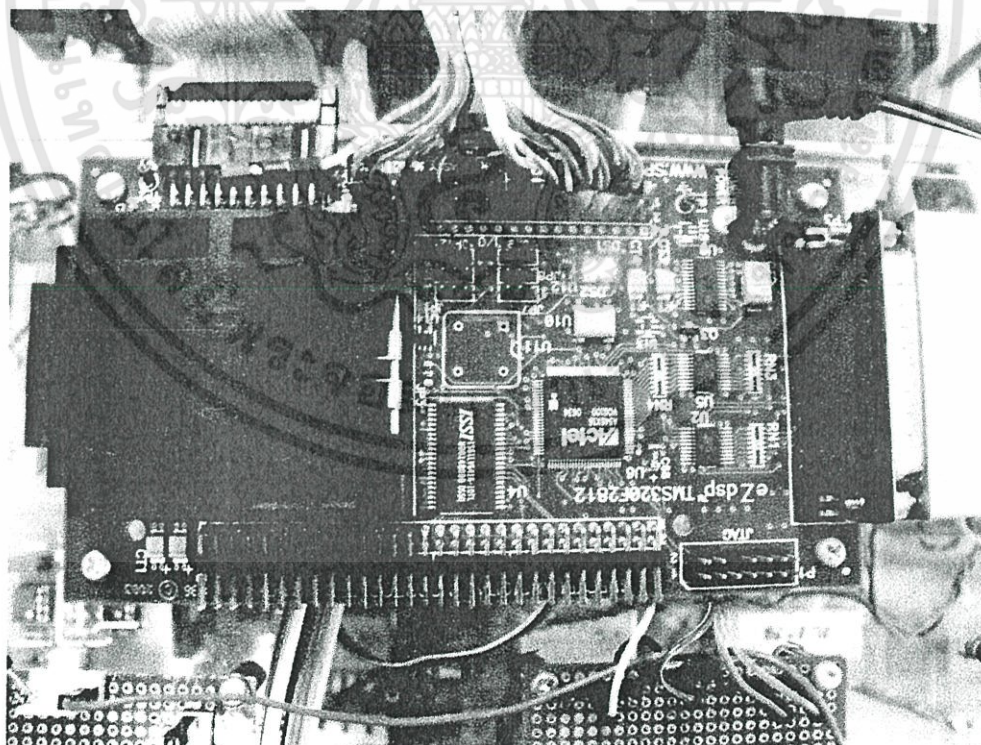


รูปที่ ข.2 เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ (ซ้าย), อินดักชันมอเตอร์ (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

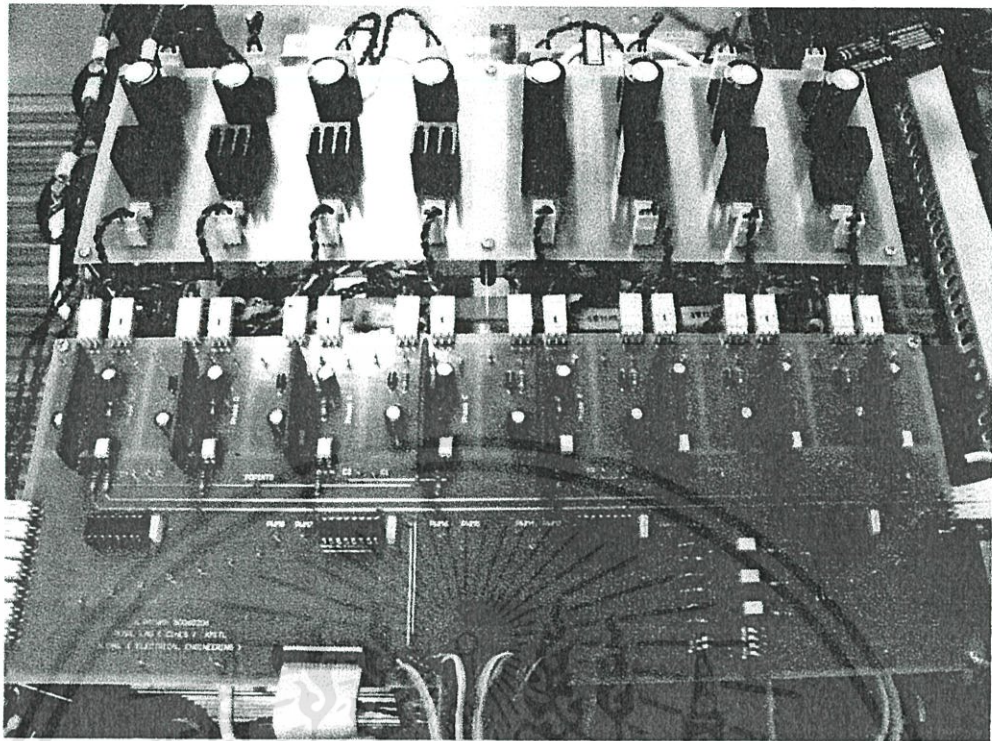


รูปที่ ข.3 ภาพรวมของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแทนซ์

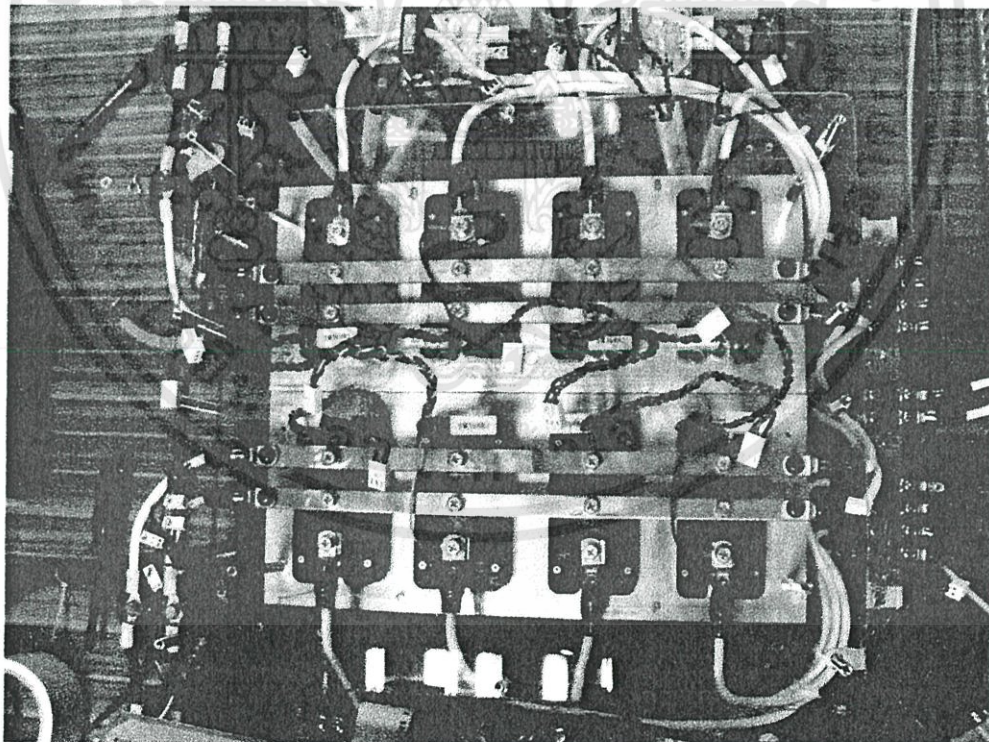


รูปที่ ข.4 ตัวประมวลผล DSP320F2812

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

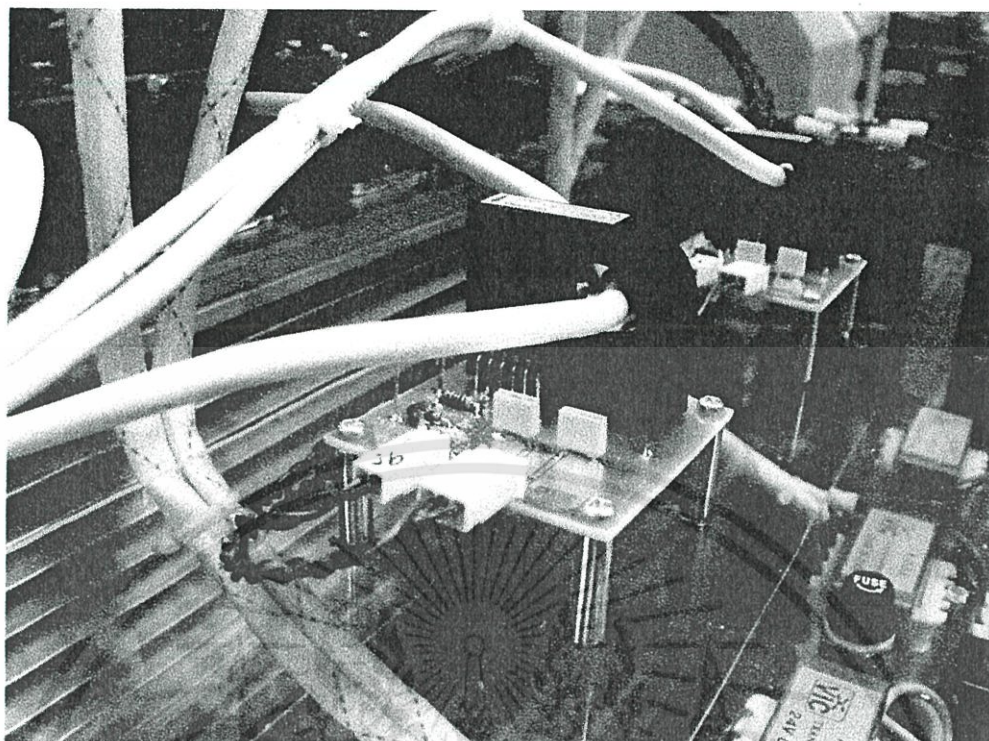


รูปที่ ข.5 วงจร IGBT Gate Drives

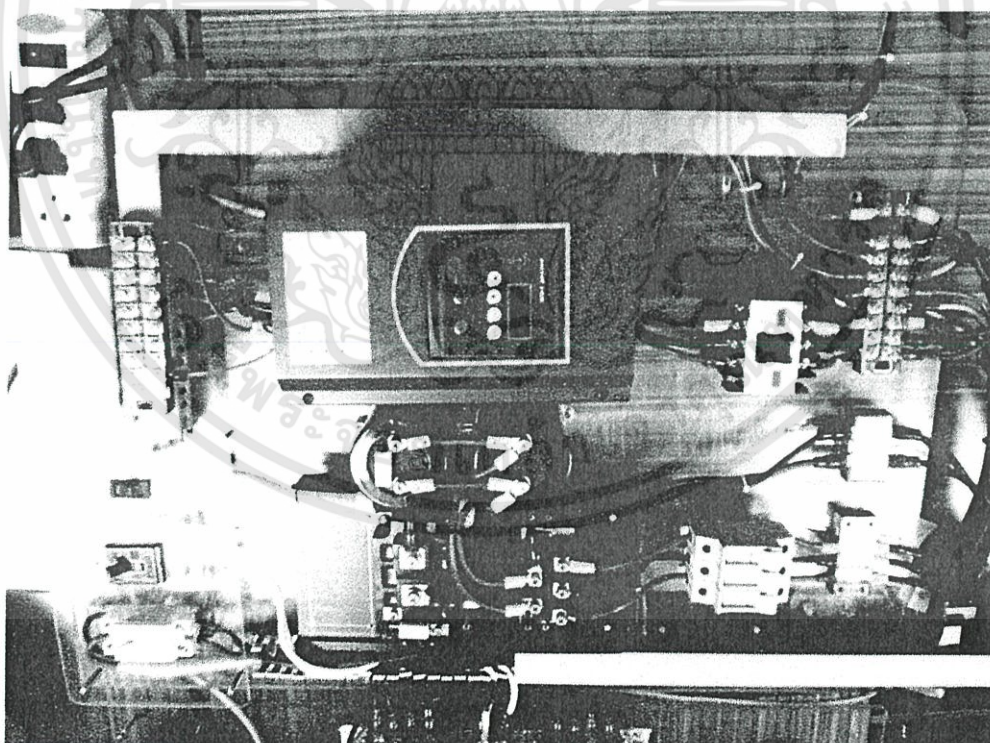


รูปที่ ข.6 วงจร Asymmetrical Half- Bridge Converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

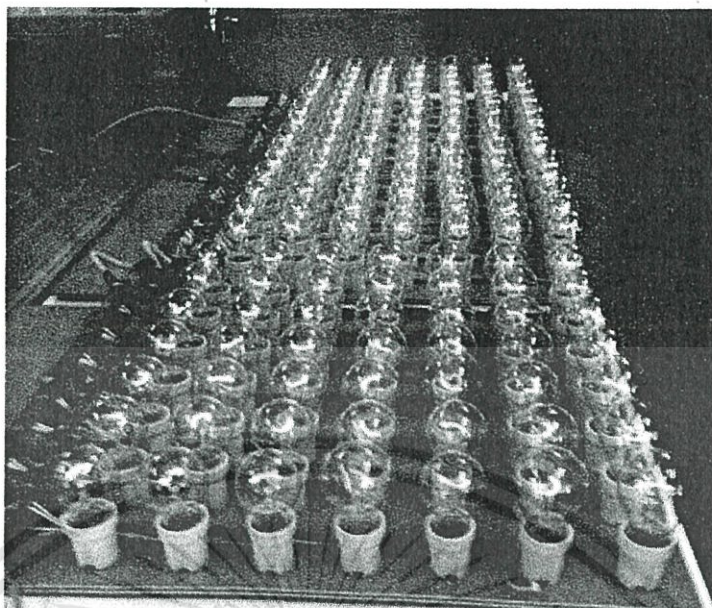


รูปที่ ข.7 วงจรวัดกระแสแต่ละเฟส



รูปที่ ข.8 Inverter (บน) และ Rectifier (ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



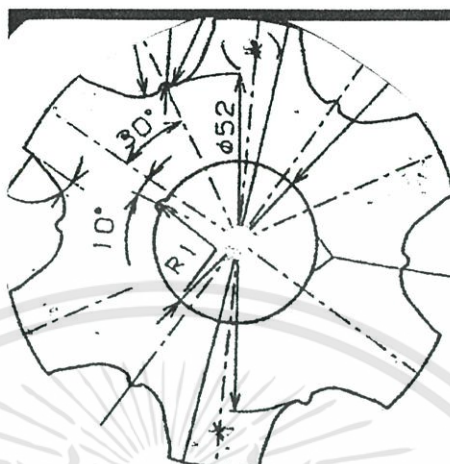
รูปที่ ข.9 Load (หลอดไฟ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

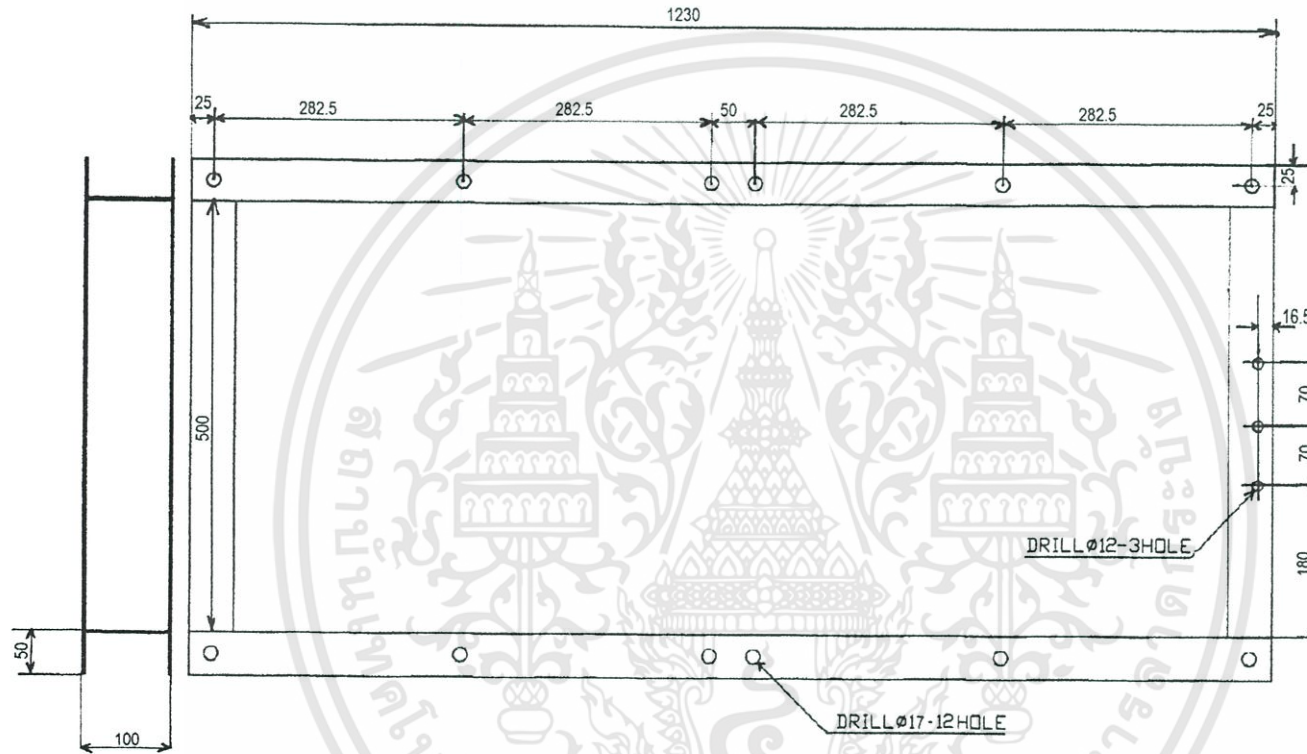
## ภาคผนวก ค

## โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตช์รีลักแตนซ์



รูปที่ ค.1 โครงสร้างส่วน Rotor ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตช์รีลักแตนซ์

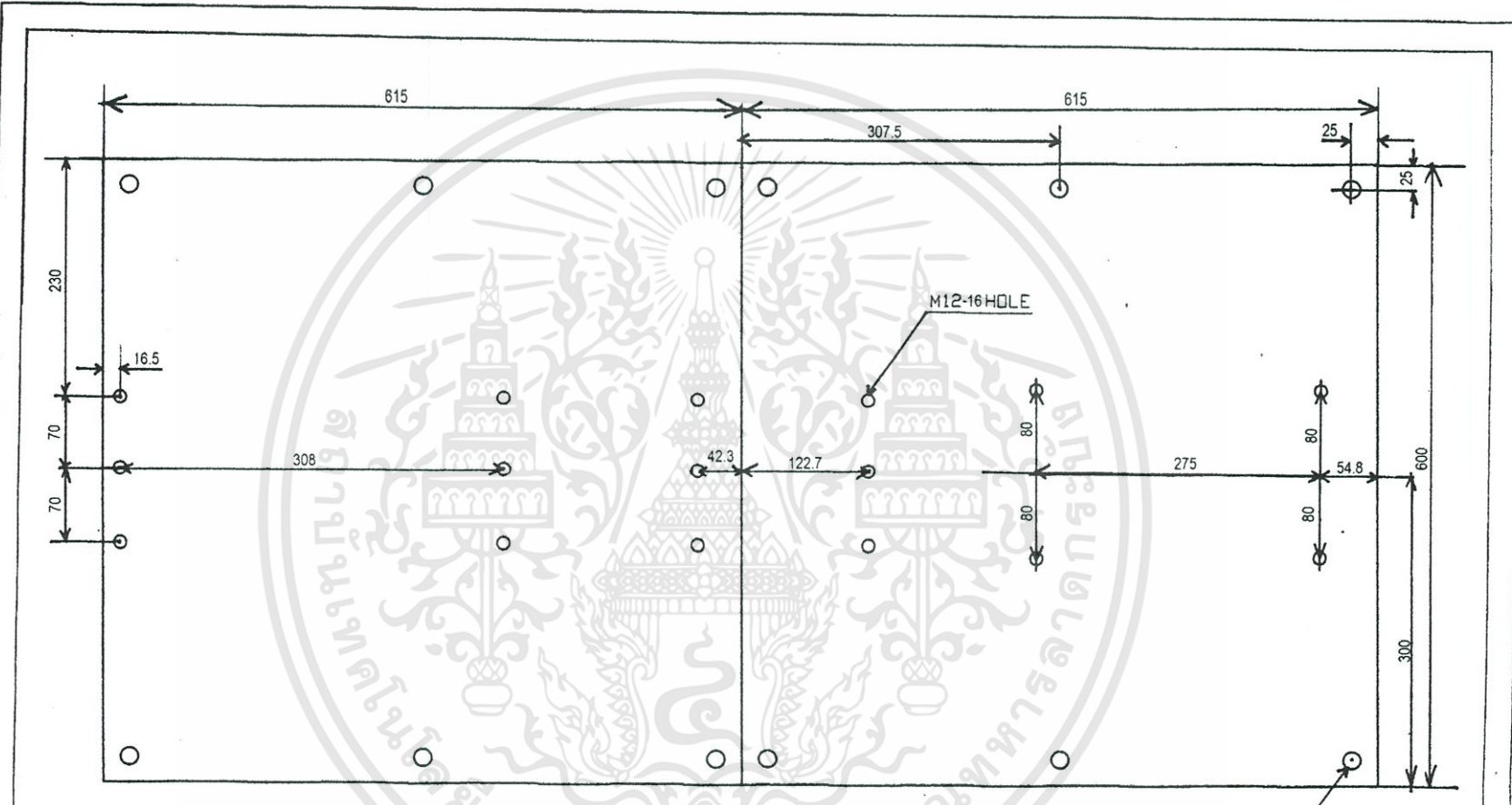




หน้า 2.3 mm


0	BASE	1230x600x100			1
ND.	PART NAME	SIZE	MATERIAL	HEAT	Q'TY
DRAFTING			PART NO.	SATHORN	
DESIGN			PART NAME	MAIN PLC	
CHECK			 PART&DIE CO.,LTD.		
APPROVE					
SCALE	NON	DATE			

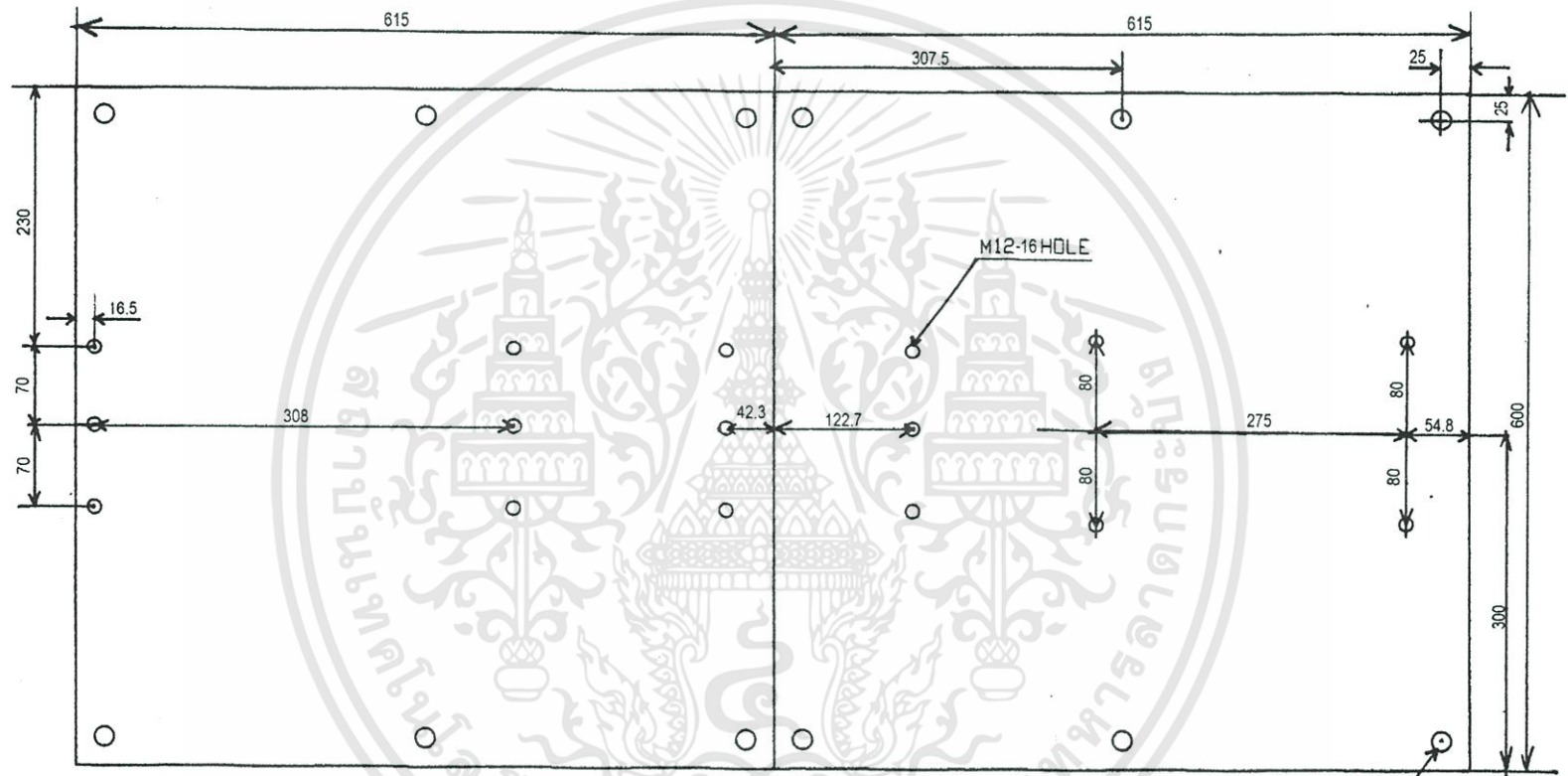
โครงการสร้างของฟลายชีล  
๑ บริเวณตบ



หนา 20 mm

DRILL Ø17-12 HOLE

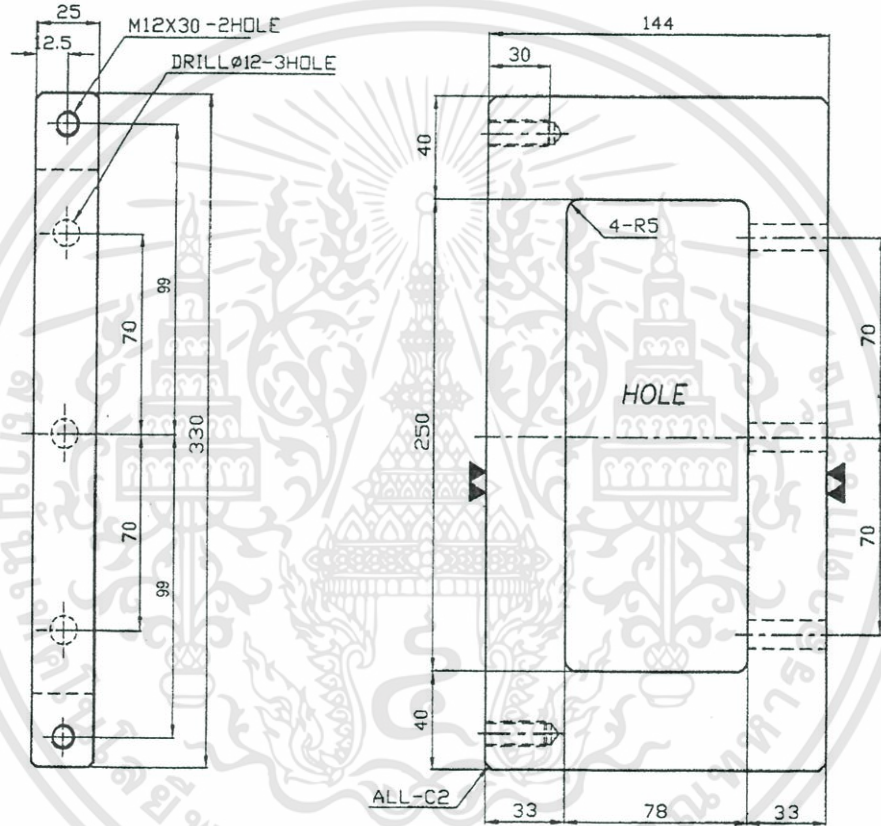
1	PLATE	1230x600x20			
NO.	PART NAME	SIZE	MATERIAL	HEAT	Q'TY
DRAFTING			PART NO.	SATHORN	
DESIGN			PART NAME	MAIN PLC	
CHECK					
APPROVE					
SCALE	NON	DATE			
			 PART&DIE CO.,LTD.		



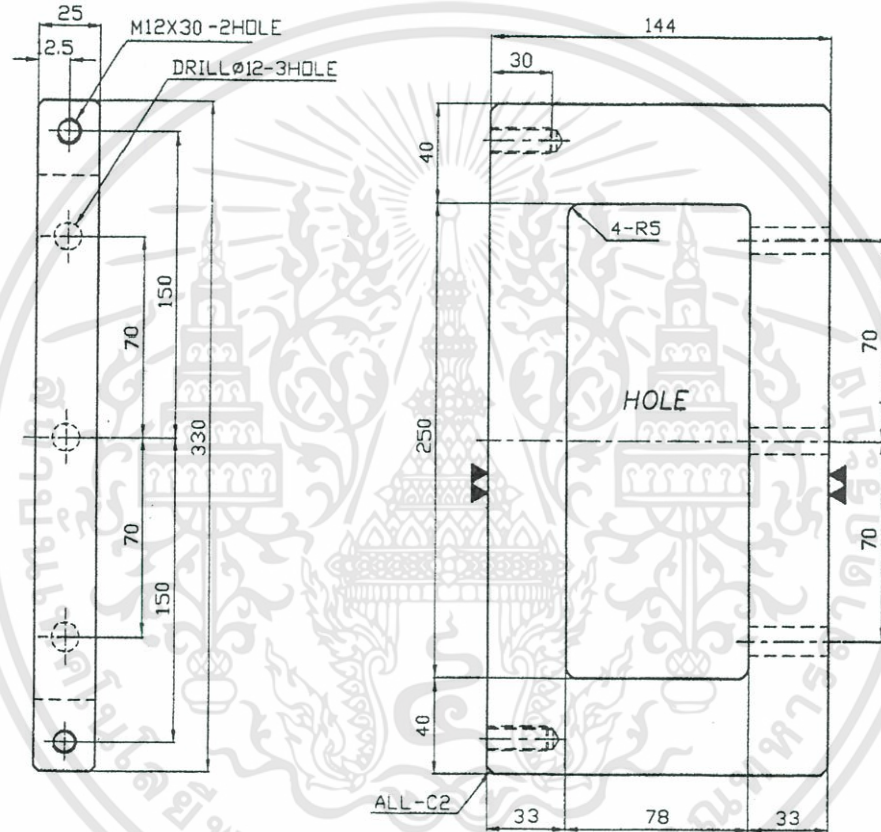
หนา 20 mm

DRILL Ø17-12HOLE

1	PLATE	1230x600x20			
NO.	PART NAME	SIZE	MATERIAL	HEAT	Q'TY
DRAFTING			PART NO.	SATHORN	
DESIGN			PART NAME	MAIN PLC	
CHECK			 PART & DIE CO., LTD.		
APPROVE					
SCALE	NON	DATE			

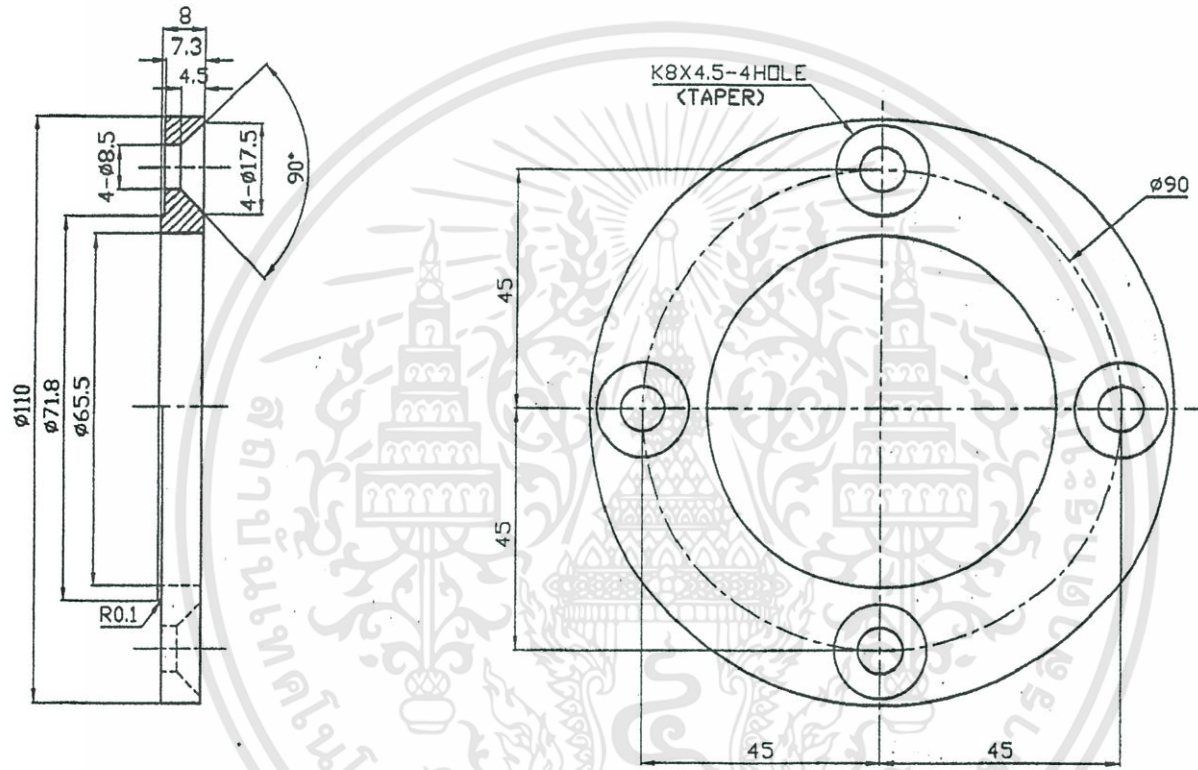


SUPPORT		25X330X144			
NO.	PART NAME	SIZE	MATERIAL	HEAT	Q'TY
DRAFTING			PART NO.	SATHORN	
DESIGN			PART NAME	MAIN PLC	
CHECK			 PART & DIE CO., LTD.		
APPROVE					
SCALE	NON	DATE			



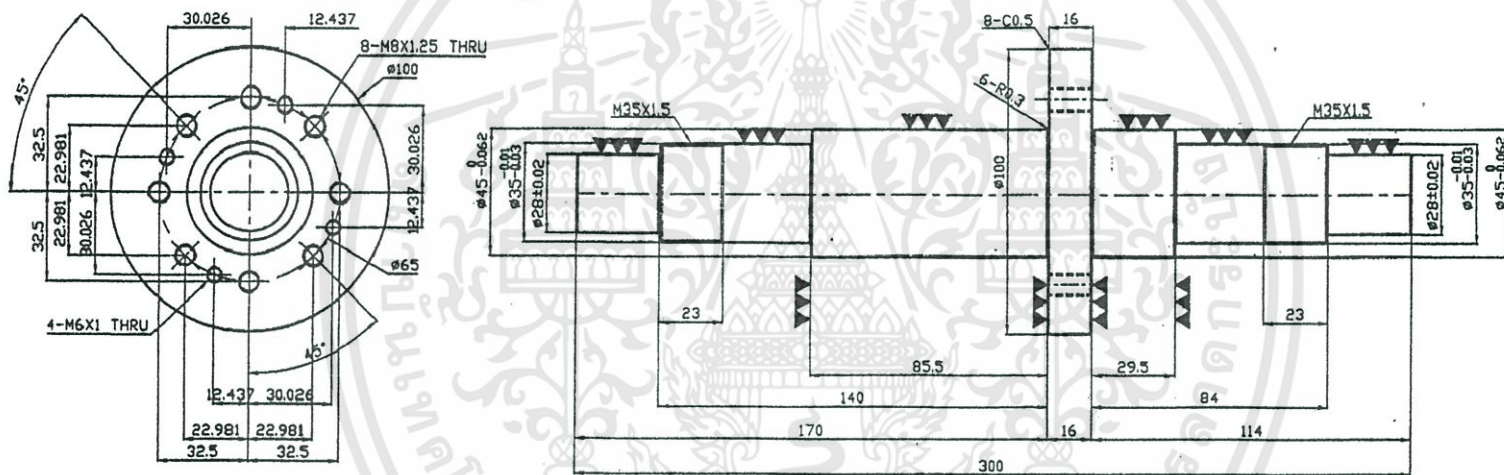
SUPPORT		25X330X144			
NO.	PART NAME	SIZE	MATERIAL	HEAT	Q'TY
DRAFTING		PART NO.		SATHORN	
DESIGN		PART NAME		MAIN PLC	
CHECK					
APPROVE					
SCALE	NON				
PART&DIE CO.,LTD.					



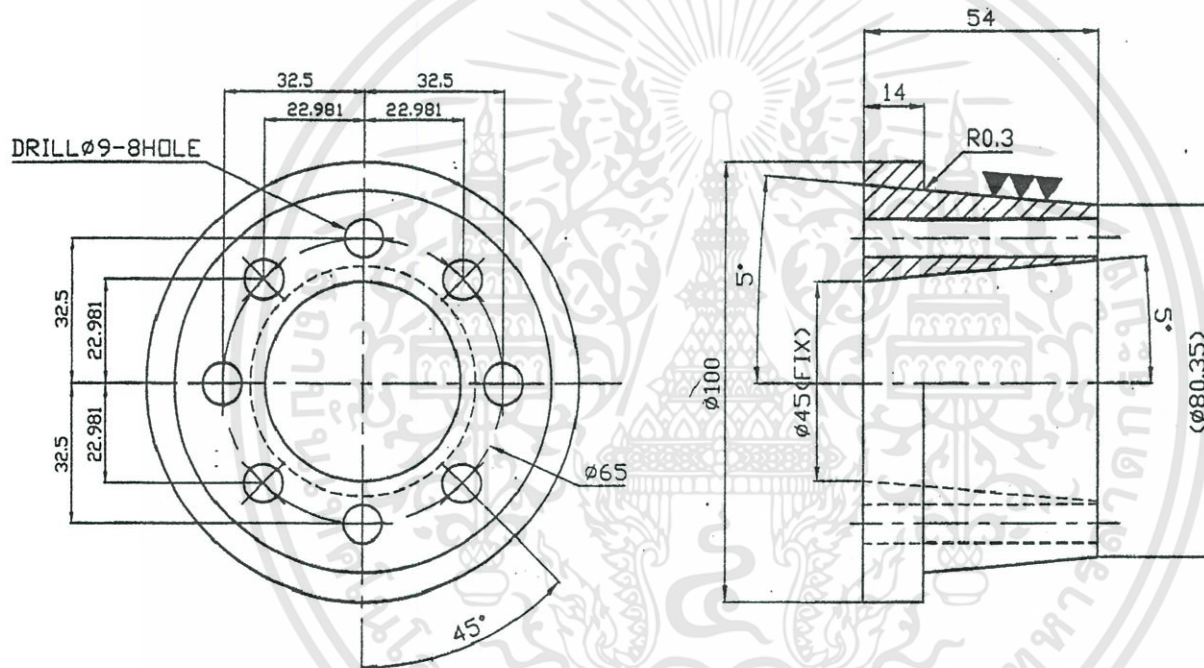


8	COVER BEARING	Ø110X8	S50C		2
NO.	PART NAME	SIZE	MATERIAL	HEAT	Q'TY
DRAFTING			PART NO.	SATHORN	
DESIGN			PART NAME	MAIN PLC	
CHECK					
APPROVE					
SCALE	NON	DATE	14/01/10	PART&DIE CO.,LTD.	



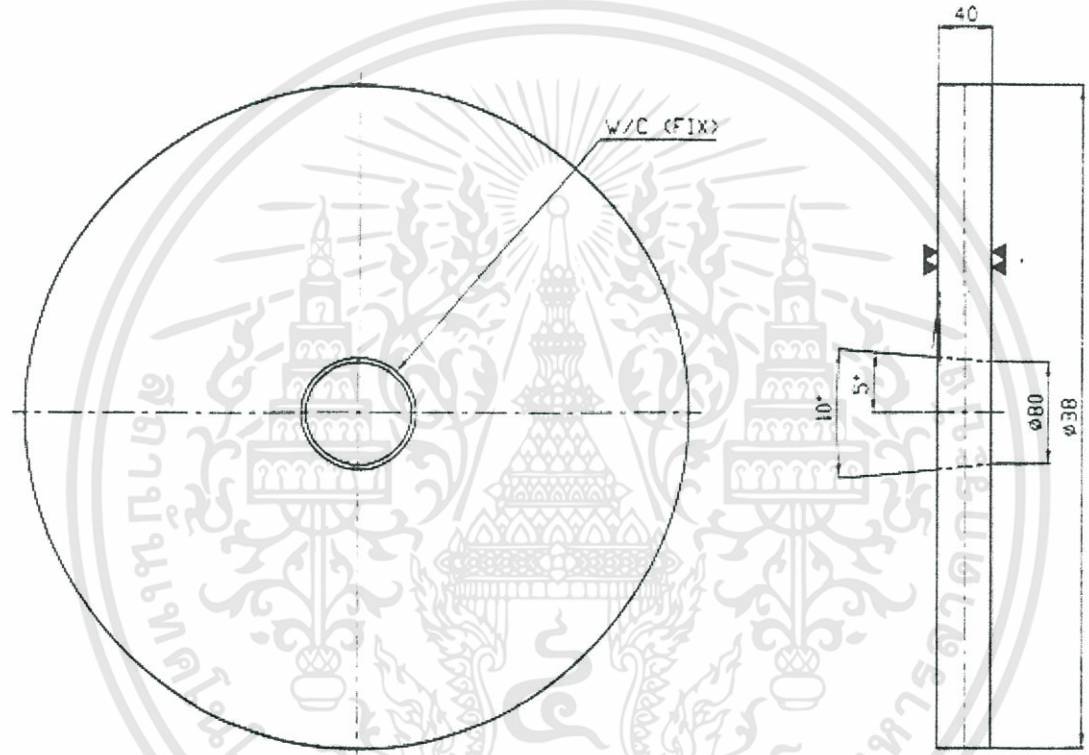



10	SHAFT	Ø100X300	SCM440	1	
NO.	PART NAME	SIZE	MATERIAL	HEAT	Q'TY
DRAFTING		PART NO.	SATHORN		
DESIGN		PART NAME	MAIN PLC		
CHECK					
APPROVE					
SCALE	NON	DATE	14/01/10	PART&DIE CO.,LTD.	

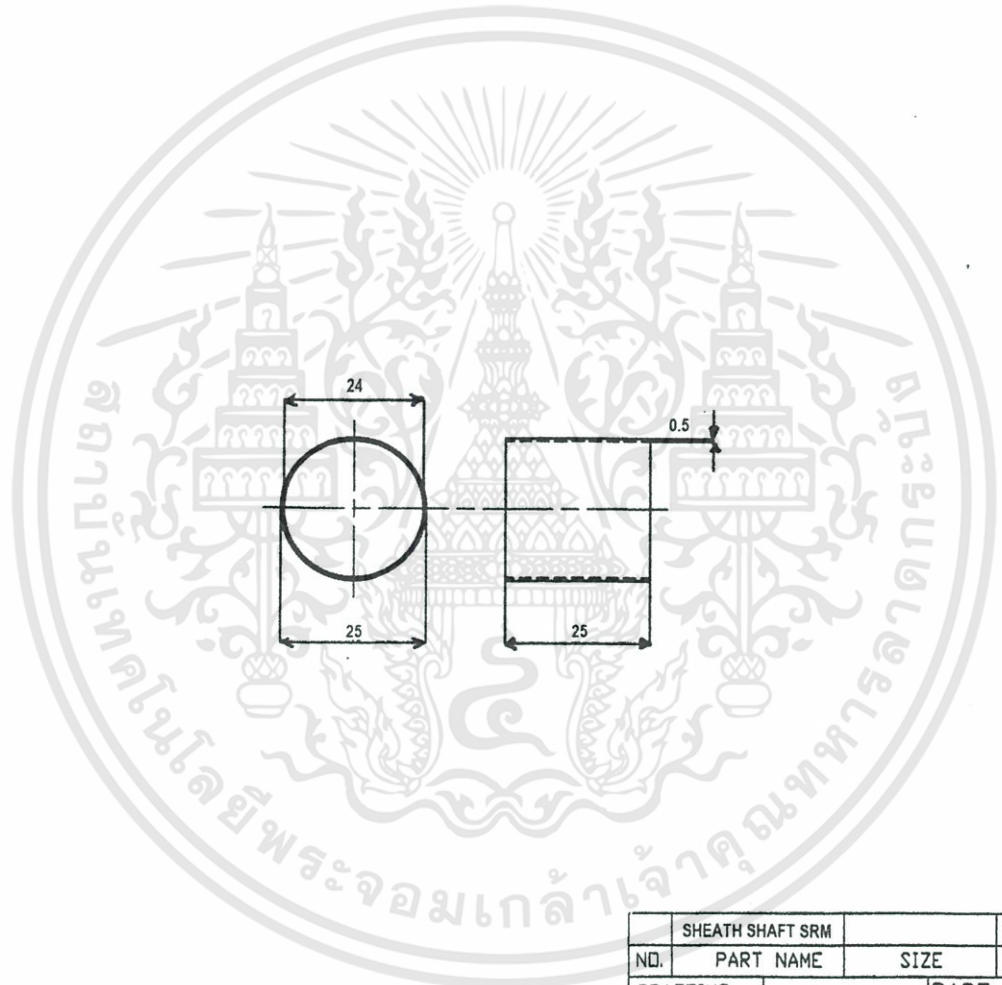



NO.11/1  $\phi 100 \times 54 = 1 \text{ PCS}$

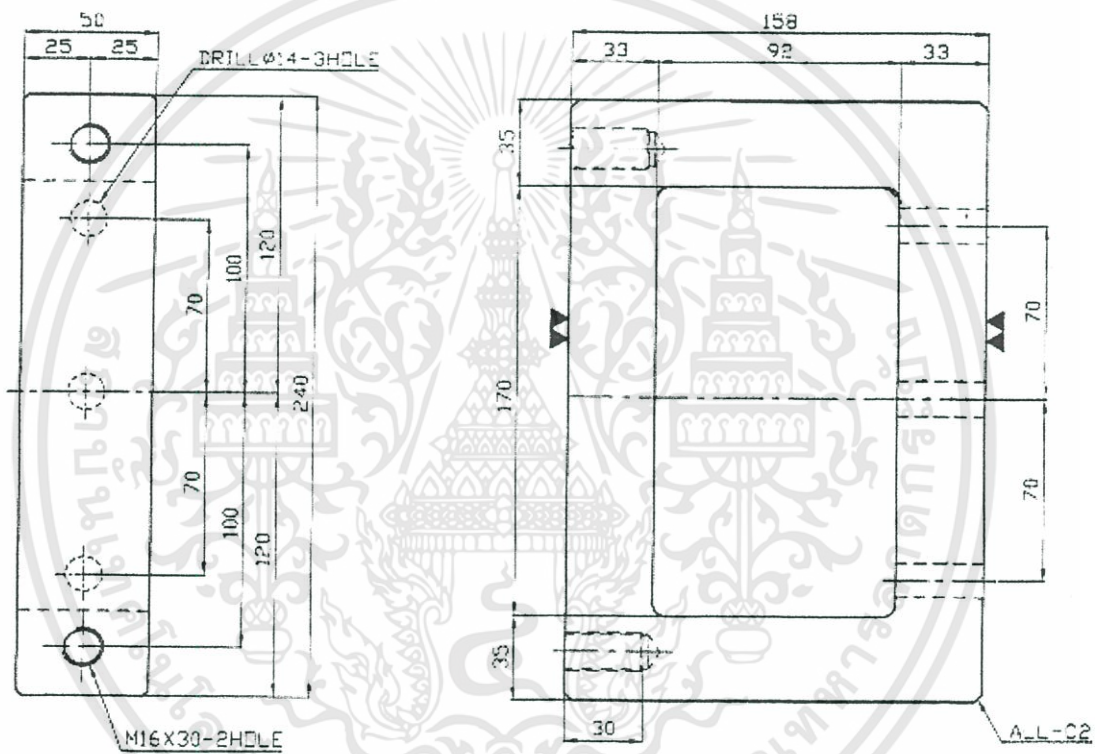
11	MECHA LOCK	$\phi 100 \times 56$	S50C		1
NO.	PART NAME	SIZE	MATERIAL	HEAT	Q'TY
DRAFTING		PART NO.	SATHORN		
DESIGN		PART NAME	MAIN PLC		
CHECK					
APPROVE					
SCALE	NON	DATE	06/02/10		
			PART&DIE CO.,LTD.		



12	FLY WHEEL	Ø500X40	SS41	1
NO	PART NAME	SIZE	MATERIAL	HEAT Q'TY
DRAFTING		PART NO.	SATHORN	
DESIGN		PART NAME	MAIN PLC	
CHECK				
APPROVE				
SCALE	NON	DATE	14/01/10	
			PART&DIE CO.,LTD.	

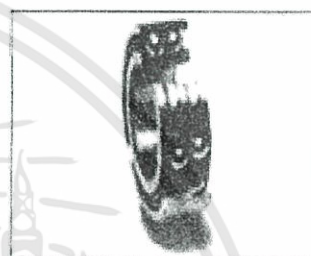
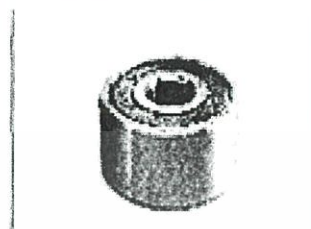
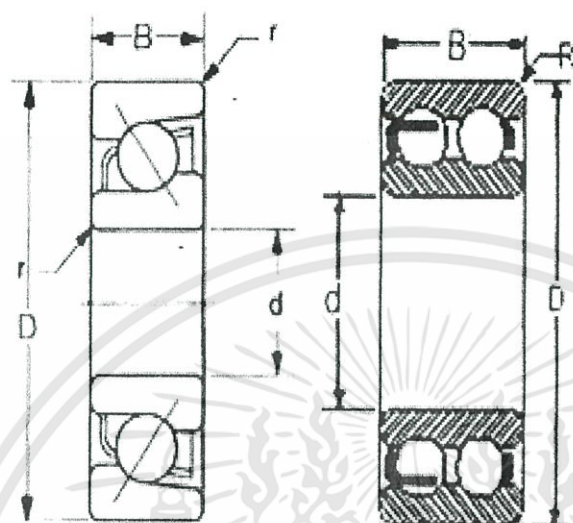


SHEATH SHAFT SRM					1
NO.	PART NAME	SIZE	MATERIAL	HEAT	Q'TY
DRAFTING			PART NO.	SATHORN	
DESIGN			PART NAME	MAIN PLC	
CHECK					
APPROVE					
SCALE	NON	DATE	PART&DIE CO.,LTD.		



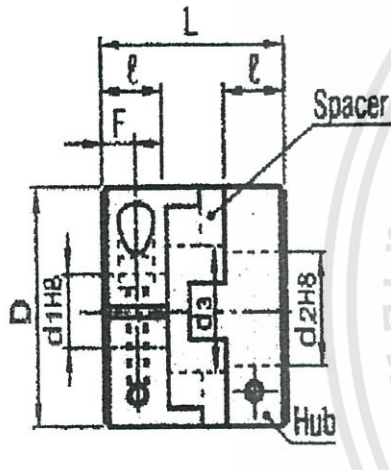
6	SUPPORT#3	50X158X240	SS41	2	
NO.	PART NAME	SIZE	MATERIAL	HEAT	Q'TY
DRAFTING		PART NO.	SATHORN		
DESIGN		PART NAME	MAIN PLC		
CHECK					
APPROVE					
SCALE	NON	DATE	14/01/10	PART&DIE CO.,LTD.	

## 角接触球轴承



轴承名称	NSK 7207CTYNSULP4轴承
新型号	7207CTYNSULP4
旧型号	7207CTYNSULP4
内径 d (mm)	35
外径 D (mm)	72
厚度 B (mm)	17
NSK型号	7207CTYNSULP4
轴承品牌	NSK
轴承类型	角接触球轴承
详细说明	高精密角接触球轴承 (72系列)
备注	C 接触角 $\alpha=15^\circ$   TYN 滚动体引导聚酰胺树脂保持架...极限 dmn=140万 连续使用温度极限=120°C   SU 自由组合(单列)   L 轻预紧   P4 精度 ISO4级

■ Clamping Type  
MFJC (Standard Bore)



D = 70 mm  
d1 = 25 mm  
d2 = 28 mm

■ Clamping type

Part Number	Type	D	d1, d2 select (must be d1<d2)					d3	L	l	F	A	Clamp Screw		Unit Price			
			14	15	16	18	20						M	Tightening Torque (N·m)	MFJC	MFJCLK MFJCRK	MFJCWK	
MFJC	44	44	14	15	16	18	20	22.5	46	15	7.5	14.5	M5	8.4	2,271	2,680	3,090	
MFJCLK MFJCRK	55	55				18	20	22	25	28	57	19	9.5	M6	14.4	2,803	3,013	3,422
MFJCWK	70	70						22	25	28	30	35	39	M8	30.0	2,976	3,386	3,795

① When the shaft diameter is small, clamp screw tightening torque should be higher than the prescribed value to prevent s

Part Number	Type	D	Allowable Torque (N·m)	Set Torque (N·m)	Clamping Torque (N·m)	Shaft Diameter (mm)	Shaft Tolerance (mm)	Shaft Surface Roughness (Ra)	Shaft Hardness (HRC)	Shaft Length (mm)	Shaft Material	Shaft Heat Treatment	Shaft Surface Coating	Shaft Surface Finish (µm)	Shaft Material	Shaft Material
MFJC	44	44	30	25	25	1	1	1500	12000	4 x 10 <sup>4</sup>	±0.5	140				
MFJCLK MFJCRK	55	55	45	40	40	2	1.5	2800	10000	11 x 10 <sup>4</sup>	±0.6	280				
MFJCWK	70	70	80	72	72	2	2	4800	8000	40 x 10 <sup>4</sup>	±0.8	450				

Spec.	Shaft Bore Dia.		Keyway Width		Keyway	
	LDC (Left Shaft)	RDC (Right Shaft)	KLH (Left Shaft)	KRH (Right Shaft)	LK (Left Shaft)	RK (Right Shaft)
	LDC	RDC	KLH	KRH	LK	RK
	410	410	Free of Charge	Free of Charge	456	456

STOCK ITEM (RoHS) MFJS

② Polycetal

Part Number	Type	No.	D1	T	ds	W	G	Applicable Couplings		Unit Price
								MFJ	MFJC	
MFJS	44	44.3	14	22.5	10.4	9	MFJ_44	MFJC_44	1,402	
	55	55	17	28	13	11	MFJ_55	MFJC_55	1,679	
	70	69	25	39	16	16.5	MFJ_70	MFJC_70	1,882	

① Operating temperature: -20°C~80°C  
 ② d1, d2 tolerance are values before air machining.  
 ③ The lateral, angular, and axial misalignment values shown are for each occurring separately alone. If more than one misalignment are occurring simultaneously, allowable value will be reduced to 1/2 each.  
 ④ If more than one misalignment are occurring simultaneously, allowable value will be reduced to 1/2 each.  
 ⑤ For the selection criteria and alignment procedure, see B010.

Shapes	Standard Bore	Keywayed Bore			Hub	Spacers	Material
		d (Dia Side)	d2 (Dia Side)	d3 (Dia Side)			
Set Screw	MFJ	-	-	MFJWK	Aluminum Alloy	Polycetal	Set Screw: stainless steel Part No. 100
Clamping	MFJC	MFJCLK	MFJCRK	MFJCWK	Aluminum Alloy	Polycetal	

## ภาคผนวก จ ตารางบันทึกผลการทดลอง

## จ.1 มอเตอร์ SRM เป็นต้นกำลังทางกลให้กับฟลายวีล

Time (s)	Speed (rpm)	Vdc (V)	Idc (A)	Power (w)
0	0	47.9	20.85	998.715
2	250	38.016	26.15	994.1184
4	291	40.672	28.69	1166.88
6	500	42.476	30.14	1280.227
8	583	43.453	35	1520.855
10	666	45.186	39.3	1775.81
12	791	46.868	42.1	1973.143
14	1000	47.125	40.8	1922.7
16	1083	47.309	43.06	2037.126
18	1250	47.315	42.86	2027.921
20	1375	47.468	42.92	2037.327
22	1458	47.458	36.71	1742.183
24	1541	47.301	43.59	2061.851
26	1666	47.258	42.76	2020.752
28	1791	47.463	46.13	2189.468
30	1916	47.579	42.65	2029.244
32	2041	47.812	41.99	2007.626
34	2166	47.735	41.95	2002.483
36	2291	47.669	42.77	2038.803
38	2375	47.615	42.91	2043.16
40	2458	47.566	41.54	1975.892
42	2583	47.498	42.49	2018.19
44	2708	47.421	42.93	2035.784
46	2873	47.398	42.83	2030.056
48	2916	47.208	42.83	2021.919
50	3000	47.149	42.86	2020.806
52	3083	46.982	42.59	2000.963

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time (s)	Speed (rpm)	Vdc (V)	Idc (A)	Power (w)
54	3168	47.274	42.61	2014.345
56	3251	47.324	42.73	2022.155
58	3275	47.354	42.73	2023.436
60	3458	47.369	42.37	2007.025
62	3500	47.258	42.8	2022.642
64	3625	47.568	42.93	2042.094
66	3666	47.719	42.64	2034.738
68	3750	47.654	42.86	2042.45
70	3875	47.644	42.83	2040.593
72	3958	47.656	42.67	2033.482
74	4041	47.549	42.76	2033.195
76	4083	47.489	42.83	2033.954
78	4166	47.489	42.86	2035.379
80	4250	46.856	42.97	2013.402
82	4333	46.984	42.84	2012.795
84	4376	47.169	42.71	2014.588
86	4541	47.242	59.09	2791.53
88	4500	47.319	61.44	2907.279
90	4583	47.282	62.29	2945.196
92	4625	47.343	61.18	2896.445
94	4708	47.478	60.16	2856.276
96	4750	47.478	45.81	2174.967
98	4833	47.548	45.77	2176.272
100	4875	47.511	51.65	2453.943
102	4916	47.555	50.82	2416.745
104	4958	47.595	39.37	1873.815
106	5041	47.599	42.72	2033.429
108	5000	47.578	42.84	2038.242
110	5125	47.589	59.55	2833.925
112	5208	47.132	57.1	2691.237
114	5208	47.137	43.13	2033.019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time (s)	Speed (rpm)	Vdc (V)	Idc (A)	Power (w)
116	5291	47.059	47.98	2257.891
118	5291	47.098	42.83	2017.207
120	5416	47.077	43.11	2029.489
122	5305	47.122	42.8	2016.822
124	5458	47.151	43.06	2030.322
126	5460	47.2	43.01	2030.072
128	5541	47.2	42.47	2004.584
130	5583	47.2	42.37	1999.864
132	5583	47.236	42.7	2016.977
134	5623	47.251	42.84	2024.233
136	5665	47.301	42.68	2018.807
138	5666	47.528	42.86	2037.05
140	5708	47.525	43.08	2047.377
142	5760	47.503	42.47	2017.452
144	5750	47.503	42.34	2011.277
146	5750	47.555	42.8	2035.354
148	5833	47.687	42.84	2042.911
150	5875	47.691	43.06	2053.574
152	5916	47.688	43	2050.584
154	5916	47.777	42.86	2047.722
156	5916	47.698	42.86	2044.336
158	5958	47.864	42.78	2047.622
160	5958	47.685	42.9	2045.687
162	6000	47.556	42.73	2032.068
164	6041	47.695	54.14	2582.207
166	6041	47.765	53.14	2538.232
168	6125	47.865	42.88	2052.451
170	6083	47.565	45.4	2159.451
172	6125	47.6	49.04	2334.30
174	6166	47.7	58.3	2780.91
176	6208	47.8	54.2	2590.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time (s)	Speed (rpm)	Vdc (V)	Idc (A)	Power (w)
178	6208	47.9	63.7	3051.23
180	6260	47.5	62.3	2959.25
182	6260	47.6	42.47	2021.572
184	6375	47.3	57.16	2703.67
186	6375	47.8	42.55	2033.89
188	6333	47.8	48.32	2309.70
190	6333	47.8	51.18	2446.40
192	6375	47.9	54.99	2634.021
194	6333	48	57.96	2782.08
196	6416	48.5	49.15	2383.78
198	6376	47.6	48.49	2308.12
200	6416	47	56.33	2647.51
202	6500	48.3	50	2415.00
204	6500	48.1	60.15	2893.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## จ.2 จ่ายโหลด 150 W

Time (s)	Speed (rpm)	Vdc (V)	Idc (A)	Power (W)
0	6500	47.89	3.2	153.248
2	6416	47.23	3.15	148.7745
4	6250	46.25	2.5	115.625
6	6083	46.35	2.27	105.2145
8	6000	45.52	2.21	100.5992
10	5833	45.23	2.18	98.6014
12	5750	45.98	2.18	100.2364
14	5625	43.15	2.18	94.067
16	5500	43.88	2.19	96.0972
18	5375	43.61	2.69	117.3109
20	5166	42.52	2.23	94.8196
22	5083	42.16	2.42	102.0272
24	4958	48.15	2.69	129.5235
26	4833	39.87	2.50	99.675
28	4583	37.87	2.56	96.9472
30	4458	37.62	2.39	89.9118
32	4250	37.05	2.43	90.0315
34	4125	35.42	2.42	85.7164
36	3958	36.76	2.33	85.6508
38	3791	36.54	2.19	80.0226
40	3583	42.15	2.17	91.4655
42	3458	35.21	2.16	76.0536
44	3250	31.25	2.09	65.3125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## จ.3 จ่ายโหลด 425 W

Time (s)	Speed (rpm)	Vdc (V)	Idc (A)	Power (W)
0	6500	47.12	9.04	425.9648
2	6250	47.23	8.56	404.2888
4	6166	46.25	8.3	383.875
6	6000	46.35	10.9	505.215
8	5833	47.02	10.68	502.1736
10	5666	47.62	8.45	402.389
12	5541	46.53	8.94	415.9782
14	5375	46.64	9.74	454.2736
16	5208	46.54	10.48	487.7392
18	5041	46.21	9.36	432.5256
20	4833	45.78	9.79	448.1862
22	4666	45.63	9.01	411.1263
24	4416	45.56	9.13	415.9628
26	4250	39.87	9.04	360.4248
28	4083	37.87	8.47	320.7589
30	3875	37.62	8.17	307.3554
32	3708	37.05	8.03	297.5115
34	3541	35.42	7.57	268.1294
36	3333	36.76	7.63	280.4788
38	3166	29.86	7.33	218.8738
40	2958	24.01	6.97	167.3497
42	2791	21.96	6.87	150.8652
44	2625	24.85	7.35	182.6475

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## จ.4 จ่ายโหลด 580 W

Time (s)	Speed (rpm)	Vdc (V)	Idc (A)	Power (W)
0	6500	47.28	12.31	582.0168
2	6375	47.23	11.65	550.2295
4	6208	46.25	12.81	592.4625
6	6125	46.13	12.85	592.7705
8	5833	47.65	12.55	598.0075
10	5666	46.21	14.23	657.5683
12	5541	46.69	13.97	652.2593
14	5416	46.31	13.69	633.9839
16	5166	46.09	13.27	611.6143
18	5000	45.98	13.18	606.0164
20	4833	45.54	12.86	585.6444
22	4625	42.15	12.47	525.6105
24	4416	35.76	11.91	425.9016
26	4208	34.86	11.48	400.1928
28	4000	32.64	11.95	390.048
30	3833	35.69	11.47	409.3643
32	3625	27.65	10.58	292.537
34	3416	32.44	10.26	332.8344
36	3208	24.73	10.39	256.9447

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ.5 ทดสอบประสิทธิภาพของสวิตช์รีลักแตนซ์เจนเนอเรเตอร์โหลด 49 หลอด (4900W, 220Vac)

Speed	Vin	lin(rms)	Vout	Iout	Pin	Pout	cos	Eff(%)
5000	429.256	3.98976	39.6158	9.32603	1468.43	369.4581	0.618784	25.16008
5000	428.659	4.07396	39.1417	9.18025	1457.061	359.3306	0.602141	24.66133
5000	427.057	4.03769	39.6146	9.25987	1438.692	366.826	0.602141	25.49719
5500	426.107	4.60272	44.3945	9.68874	1535.809	430.1268	0.565136	28.00653
5500	426.82	4.8296	45.4173	9.90805	1766.053	449.9969	0.618297	25.48037
5500	422.207	4.7093	45.7619	9.96282	1632.094	455.9176	0.592397	27.93452
6000	429.633	4.99646	48.501	10.1476	1751.413	492.1687	0.588814	28.10124
6000	428.175	5.17195	50.0975	10.3863	1567.655	520.3277	0.510886	33.19146
6000	426.175	5.05427	49.8371	10.3765	1662.093	517.1347	0.556876	31.11347
6500	429.388	5.79234	54.3335	10.7803	1909.773	585.7314	0.55415	30.67021
6500	427.536	5.786	54.146	10.733	1740.805	581.149	0.507865	33.38392
6500	432.062	5.86453	56.5641	11.1202	1958.041	629.0041	0.557689	32.12416
7000	429.141	6.72811	60.0352	11.1723	1863.25	670.7313	0.465723	35.99792
7000	427.1	7.07467	62.3019	11.8017	2450.62	735.2683	0.585315	30.00336
7000	429.07	7.11172	65.2964	11.8939	1846.24	776.6289	0.436651	42.06544

จ.6 ทดสอบประสิทธิภาพของสวิตช์รีลักแทนซ์เจนเนอเรเตอร์โหลด 98 หลอด (9800W, 220Vac)

Speed	Vin	Iin(rms)	Vout	Iout	Pin	Pout	cos	Eff(%)
5000	429.493	4.84073	38.216	17.7984	1741.747	680.1837	0.604599	39.05181
5000	423.377	4.7268	38.0876	17.6444	1902.126	672.0328	0.685953	35.33062
5000	426.113	4.5617	38.2862	17.8007	1723.929	681.5212	0.640055	39.53302
5500	422.622	5.59101	42.2826	18.5245	1999.327	783.264	0.610648	39.17638
5500	424.409	5.29624	41.9144	18.3605	1909.25	769.5693	0.612999	40.30741
5500	423.771	5.27938	42.2518	18.5639	1819.26	784.3582	0.586854	43.11414
6000	425.538	6.06247	45.8083	19.0792	2064.644	873.9857	0.577573	42.33106
6000	424.408	5.96612	45.9692	19.1283	2087.255	879.3126	0.594907	42.12771
6000	426.284	6.0518	46.9438	19.4847	2064.624	914.6859	0.577573	44.30279
6500	431.035	6.8781	52.5939	20.5291	1988.876	1079.705	0.484146	54.28721
6500	432.805	7.03907	48.998	19.2145	2160.231	941.4721	0.511731	43.58201
6500	430.607	7.0696	51.1738	20.0563	1874.193	1026.357	0.444312	54.76262
7000	429.139	7.86929	57.5813	21.7339	2115.057	1251.466	0.451999	59.16939
7000	429.734	7.53482	54.326	20.7683	2048.74	1128.259	0.456629	55.07085
7000	431.021	7.81315	55.874	21.0274	1893.87	1174.885	0.405859	62.0362

จ.7 ทดสอบประสิทธิภาพของสวิตช์รีกัตแดนซ์เจนเนอเรเตอร์โหลด 145 หลอด (14500W, 220Vac)

Speed	Vin	Iin(rms)	Vout	Iou	Pin	Pout	cos	Eff(%)
5000	423.712	5.27967	36.4939	25.7153	1984.017	938.4516	0.640055	47.30058
5000	424.798	5.59315	35.9195	25.3417	1870.197	910.2612	0.568065	48.67194
5000	423.158	5.5519	36.3587	25.6413	1735.041	932.2843	0.532985	53.7327
5500	422.715	5.7706	38.5647	25.8049	1803.069	995.1582	0.533449	55.19246
5500	424.953	6.13502	40.0287	26.3704	2068.187	1055.573	0.572509	51.03856
5500	423.589	5.92731	40.2191	26.3848	2001.932	1061.173	0.575435	53.00744
6000	426.308	7.05272	43.7883	26.4422	2052.756	1157.859	0.492727	56.40509
6000	425.658	7.0346	45.2698	26.451	2223.183	1197.431	0.535827	53.86113
6000	425.056	7.14892	44.7601	26.4545	2256.117	1184.106	0.535827	52.48425
6500	428.59	7.96931	52.766	26.4583	2421.895	1396.099	0.511731	57.64488
6500	430.888	7.7632	50.6308	26.4541	2500.976	1339.392	0.539577	53.55479
6500	429.91	8.00069	52.4091	26.4582	2440.405	1386.65	0.512043	56.8205
7000	431.729	8.53682	49.8554	26.3993	2220.65	1316.148	0.434833	59.26857
7000	429.85	8.44902	50.728	26.4288	2053.634	1340.68	0.408084	65.28331
7000	428.832	8.2666	50.516	26.2235	2088.811	1324.706	0.42524	63.41915



บทความวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

### Switched reluctance generator

จิรายุ จันทร์พูล ชลธิชา เจริญรัตน์ ฐิตินันท์ ตรงเจริญชัย ฌภัทร คล้ายทองคำ  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
ซอย นลองกรุง 1 ถนนนลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520  
โทรศัพท์ : 02-329-8000 ต่อ 3925 Email: hamnapat@gmail.com

#### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการปรับปรุงตัวฟลายวีลแบบแนวแกนนอน ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟส แบบ 8/6 เพื่อให้สามารถหมุนได้ที่ความเร็วมากกว่า Base speed ในขณะที่หมุนฟลายวีล โดยปรับพิคตของวงจรขับเคลื่อน รวมทั้งตัวโปรแกรมของวงจรควบคุม โดยจะใช้ DSP320F2812 เป็นตัวควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ ให้ทำงานเป็นมอเตอร์เพื่อหมุนฟลายวีลให้เก็บสะสมพลังงานจลน์ และควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ให้ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมีฟลายวีลเป็นต้นกำลังเพื่อคืนพลังงานที่เก็บไว้ และนำมาประยุกต์ใช้เป็น UPS โดยการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นให้รักษาระดับแรงดัน DC Bus 48 โวลต์ ที่สภาวะโหลดคงที่

คำสำคัญ: ฟลายวีล, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์, Base speed

#### Abstract

This thesis presents a method to improve horizontal-axis flywheel of 4-phases 8/6 switched reluctance generator (SRG) by adjust driver circuit to increase the efficiency of flywheel in order to make flywheel rotational speed increasing more than base speed. Including control circuit adjustment, by using DSP320F2812 to control a switched-reluctance machine. When acting as motor flywheel spin and gain kinetic energy. In generator mode kinetic energy stored in the flywheel applies a torque, which is converted to electric energy. Using switched-reluctance machine as UPS by control voltage of generator to DC bus 48 volt at constant load.

Keywords: Flywheel, Switched Reluctance Generator, Base speed

#### 1. บทนำ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่แรงบิดเกิดจากการหมุนของส่วนที่เคลื่อนที่ได้ไปยังตำแหน่งที่ทำให้ค่าความเหนียวมากที่สุดและสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ให้ค่าความเหนียวมากที่สุดตำแหน่งอื่นๆ ได้ โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดเฟสถัดไป ซึ่งเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์มีการออกแบบโครงสร้างง่าย ไม่ซับซ้อน แต่การควบคุมมีความยุ่งยากและซับซ้อน จึงจำเป็นต้องทราบตำแหน่งของโรเตอร์ เพื่อที่จะป้อนพลังงานให้กับขดลวดในเฟสต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม ให้ได้แรงบิดในทิศทางที่ต้องการ จุดประสงค์ของบทความนี้ หากต้องการให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์มีการทำงานอย่างเหมาะสม จำเป็นต้องปรับความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ในโหมดมอเตอร์ให้มากกว่า Base Speed ในขณะที่หมุนฟลายวีลเก็บสะสมพลังงานจลน์ เนื่องจากความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ที่มากกว่า Base Speed จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าด้านกลับมีค่าสูง ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

#### 2. เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟส แบบ 8/6 รุ่น RA165187 (Motion System Technology) ซึ่งมีพิคตต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 และลักษณะโดยทั่วไปแสดงดังรูปที่ 1 ตารางที่ 1 พิกัดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าสวิตซ์รีลักแตนซ์

Model	RA 165187-15T, 4 phase ,8/6
Rated output	2.32 kW
Rated speed/Max speed	6,000/12,000 rpm
Torque/Max torque	3.69/4.20 N-m
Rated voltage	48 VDC
Dimension	130 x 130 x 160 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทฤษฎีและสมการของวงจรถัด

จากสมการทางแรงดันไฟฟ้า 1 เฟสดังนี้

$$v = Ri + \frac{d\lambda(i, \theta)}{dt} \tag{1}$$

เนื่องจากว่าเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งเป็นฟังก์ชันของกระแสและตำแหน่งของโรเตอร์ ดังนั้นจาก (3) สามารถกระจายออกได้ดังนี้

$$v = Ri + \frac{d\lambda(i, \theta)}{di} \frac{di}{dt} + \frac{d\lambda(i, \theta)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \tag{2}$$

หรือแทนค่า  $\omega = d\theta/dt$  ใน (4) จะได้

$$v = Ri + L(i, \theta) \frac{di}{dt} + i\omega \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} \tag{3}$$

ในเทอมที่ 3 ของ (5) คือค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (BEMF)

$$BEMF = i\omega \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} \tag{4}$$

โดย  $\omega$  คือความเร็ว Base Speed

ที่ค่าสูงกว่าความเร็ว Base Speed ค่าของแรงดันต้านกลับจะมีค่าสูงกว่าแรงดันขาเข้ากระแสเฟสจะไม่สามารถถูกควบคุมได้จาก Current regulator ในการที่จะทำให้กระแสเพิ่มขึ้นได้นั้นจะต้องเพิ่มมุมนำกระแส โดยตั้งมุม Turn on ให้เร็วขึ้น หมายความว่า จะเป็นการเพิ่มเวลาให้กระแสสามารถเพิ่มขึ้นได้ก่อนที่แรงดันต้านกลับจะสูงมากขึ้น ดังนั้นกระแสจะมีรูปร่างเป็นแบบ Pulse

ส่วนสมการแรงบิด แสดงได้ดังนี้

$$\tau = \frac{i^2}{2} \cdot \frac{\partial L(i, \theta)}{\partial \theta} \tag{5}$$

เมื่อ  $\frac{\partial L}{\partial \theta} > 0$  แรงบิดจะมีค่าบวก และกำลังทางไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนเป็น

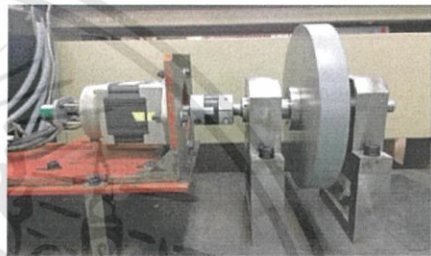
กำลังทางกล (motoring) และเมื่อ  $\frac{\partial L}{\partial \theta} < 0$  แรงบิดจะมีค่าลบ และกำลังทางกลจะถูกเปลี่ยนเป็นกำลังทางไฟฟ้า จากสมการที่ (5) การสร้างแรงบิดนั้นจะขึ้นกับขนาดของกระแสนั่นเอง

4. การแปลงผันพลังงาน

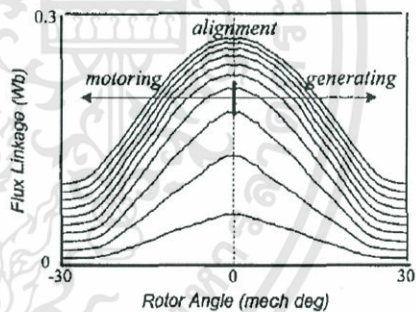
สำหรับการใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์นั้นจะต้องทำการสวิตซ์จ่ายแรงดันให้ขดลวดสเตเตอร์ในช่วงที่การเปลี่ยน

ของค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของโรเตอร์มีค่าเป็นลบ  $\frac{\partial L}{\partial \theta} < 0$

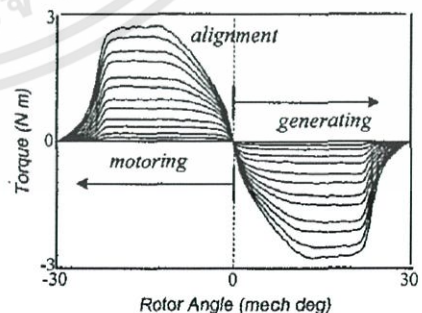
ดังแสดงในรูปที่ 2 ในโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ จะสร้างแรงบิดค่าลบเมื่อเทียบกับทิศทางการหมุนนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งส่งผลให้เกิดการต้านการหมุนของโรเตอร์ แต่โรเตอร์ยังหมุนต่อไปเนื่องจากระบบได้รับพลังงานทางกล ซึ่งจ่ายออกมาจากต้นกำลังคือตัวฟลายวีล และแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยคืนพลังงานกลับ สามารถนำไปจ่ายโหลดได้



รูปที่ 1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟสแบบ 8/6 (ซ้าย) กับฟลายวีล (ขวา)



รูปที่ 2 กราฟคุณลักษณะของฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวกับขดลวด



รูปที่ 3 กราฟคุณลักษณะของแรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**5. การรักษาระดับแรงดันใน mode generator**

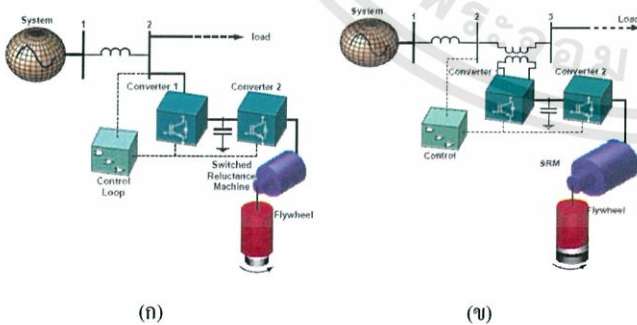
ในการรักษาแรงดันที่ความเร็วต่างๆที่มีหลายวีลเป็นต้นกำลัง จะเริ่มจากการรับค่าแรงดันที่ถูกแปลงจากพอร์ต A/D มาทำการเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาการรักษาระดับแรงดันที่ 48 โวลท์ และคงที่มุม  $\theta_n$  โดยมีกำหนดขอบเขตบน และขอบเขตล่างของแรงดัน หากค่าแรงดันที่รับมาได้มีค่ามากกว่าแรงดันอ้างอิงของขอบเขตบน โปรแกรมจะทำการปรับค่ามุม  $\theta_{off}$  ให้น้อยลง แต่หากค่าแรงดันที่รับมาได้น้อยกว่าขอบเขตล่างของแรงดันอ้างอิง โปรแกรมจะทำการปรับค่ามุม  $\theta_{off}$  ให้มากขึ้น

**6. การปรับมุมเพื่อเร่งความเร็วขณะที่ให้ SRM เป็นต้นกำลังทางกลในการหมุนหลายวีล**

เริ่มต้นกำหนดให้  $\theta_{on} = 1300$  (มุมทางไฟฟ้า) หรือ  $32.5^\circ$  (มุมทางกล) และ  $\theta_{off} = 2,300^\circ$  (มุมทางไฟฟ้า) หรือ  $57.5^\circ$  (มุมทางกล) เมื่อถึงความเร็ว 6,000 rpm จะทำการปรับมุม  $\theta_{on} = 1200$  (มุมทางไฟฟ้า) หรือ  $30^\circ$  (มุมทางกล) และ  $\theta_{off} = 2200$  (มุมทางไฟฟ้า) หรือ  $55^\circ$  (มุมทางกล) เพื่อเร่งความเร็วให้มากกว่า Base Speed (6000 rpm) เพื่อสับเปลี่ยนสภาวะการทำงานเป็นเจนเนอเรเตอร์ต่อไป

**7. การประยุกต์ใช้งาน**

Un-interruptible Power Supply (UPS) เมื่อเกิดไฟดับจะสับเปลี่ยนโหมดเป็นเจนเนอเรเตอร์โดยอาศัยพลังงานสะสมในฟลายวีลเป็นต้นกำลังขับ และประยุกต์ใช้เป็น Dynamic Voltage Restorer with energy storage (DVR) ช่วยชดเชยแรงดันที่ต่อกับระบบกริด



รูปที่ 4 (ก) การทำงานเป็น UPS และ (ข) การทำงานเป็น DVR

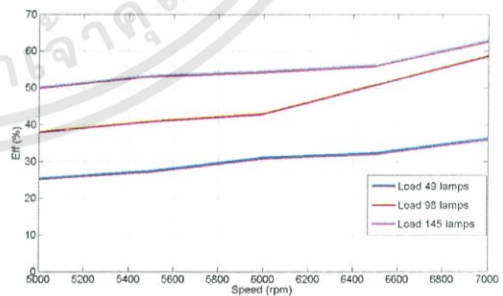
**8. ผลการทดลอง**

ในส่วนของทดลอง จะเป็นการทดสอบการควบคุม SRM ให้ทำงานในโหมดมอเตอร์หมุนหลายวีล โดยใช้การควบคุมกระแสเฟสด้วยวิธี Soft Chopping จนถึงความเร็ว 6500 rpm ซึ่งใช้เวลา 3 นาที 22 วินาที จากนั้นทำการจำลองไฟดับ โดยการตัดแหล่งจ่ายออก และเปลี่ยนการควบคุม SRM ให้ทำงานในโหมดเจนเนอเรเตอร์ เพื่อชดเชยแรงดันชั่วคราว ทั้งยังสามารถรักษาระดับแรงดัน DC bus ที่ 48 โวลท์ได้ ตามที่โปรแกรมไว้

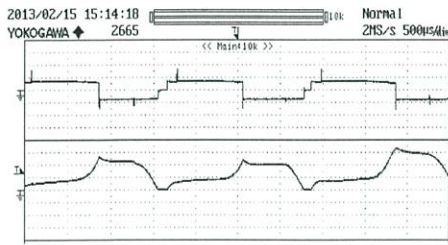
โดยในการทดลองใช้โหลดขนาดต่างๆเพื่อสังเกตช่วงเวลาในการรักษาแรงดันที่เปลี่ยนไปผลการทดสอบการจ่ายโหลด โดยนำพลังงานที่เก็บสะสมจากฟลายวีลมาใช้

1. สามารถจ่ายได้ 150 W ขณะจ่ายโหลดโหลดไฟ 15 หลอด (1500 watt, 220 Vac) คงแรงดันไฟฟ้าได้นาน 36 วินาที ดังรูปที่ 8
2. สามารถจ่ายได้ 425 W ขณะจ่ายโหลดโหลดไฟ 50 หลอด (5000 watt, 220 Vac) คงแรงดันไฟฟ้าได้นาน 24 วินาที ดังรูปที่ 9
3. สามารถจ่ายได้ 580 W ขณะจ่ายโหลดโหลดไฟ 70 หลอด (7,000 watt, 220 Vac) คงแรงดันไฟฟ้าได้นาน 20 วินาที ดังรูปที่ 10 พบว่าเมื่อจ่ายโหลดที่ขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ช่วงเวลาที่คงที่แรงดันสั้นลง หรืออาจไม่เพียงพอที่จะคงแรงดันที่ต้องการได้

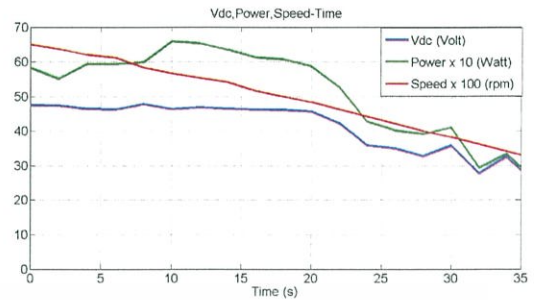
ในส่วนการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (SRG) โดยคิดจากการวัดกำลังขาเข้าและกำลังขาออกของ SRG ที่ความเร็วและ โหลดต่าง ๆ จะเห็นว่าเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ในขณะที่จ่ายโหลดคงที่ จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น และที่ความเร็วคงที่ ขณะจ่ายโหลดมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นดังรูปที่ 5



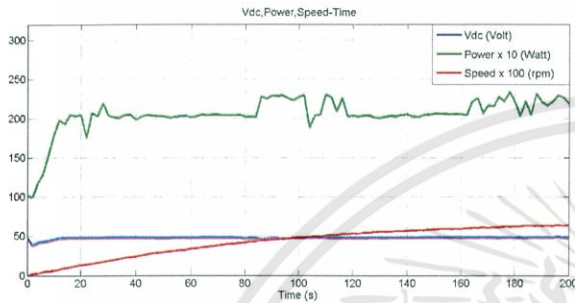
รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วรอบขณะจ่าย โหลดขนาดต่าง ๆ



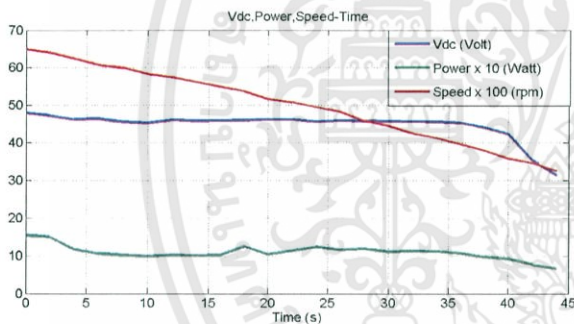
รูปที่ 6 แรงดันเฟส และกระแสเฟส ความเร็ว 6,000 rpm (Gen)



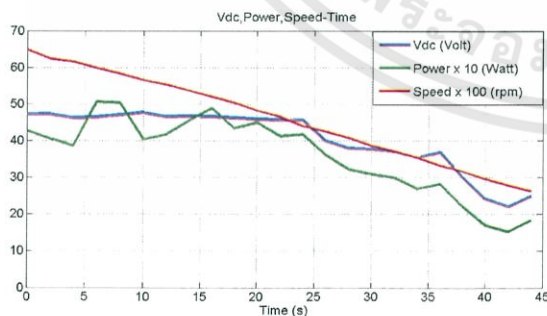
รูปที่ 10 แรงดัน ไฟฟ้า, กำลัง ไฟฟ้า และความเร็วรอบของ SRG เทียบกับ เวลา ขณะจ่าย โหลด 580 W



รูปที่ 7 แรงดัน ไฟฟ้า กำลัง ไฟฟ้า และความเร็วรอบของ SRM เทียบกับเวลา จากความเร็ว 0 rpm ถึง 6500 rpm



รูปที่ 8 แรงดัน ไฟฟ้า, กำลัง ไฟฟ้า และความเร็วรอบของ SRG เทียบกับเวลา ขณะจ่าย โหลด 150 W



รูปที่ 9 แรงดัน ไฟฟ้า, กำลัง ไฟฟ้า และความเร็วรอบของ SRG เทียบกับเวลา ขณะจ่าย โหลด 425 W

### 9. สรุป

เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์สามารถขับฟลายวีล ให้สามารถเก็บพลังงานมากเพียงพอที่จะสามารถคืนพลังงานที่เก็บไว้จ่าย โหลดได้ โดยระยะเวลาที่แรงดันคงที่ จะขึ้นอยู่กับขนาดของ โหลด ที่จ่ายด้วย สำหรับผลที่ได้จากการทดสอบการจ่าย โหลดที่ความเร็วต่าง ๆ และเมื่อจ่าย โหลดขนาดคงที่ จะพบว่าประสิทธิภาพที่ความเร็วต่ำนั้น จะมี ค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วสูงขึ้น

### 10. ข้อเสนอแนะ

- สามารถพัฒนาไปสู่ระบบผลิตไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อกับกริด (Grid Connected) ของการไฟฟ้าได้
- ควรเพิ่มฟลักคอปกรณเช่น ไดโอดบริดจ์ 3 เฟส เพื่อเพิ่มกระแส ขาเข้าให้ใกล้เคียงพิกัด เพื่อเพิ่มความเร็วให้มากขึ้น
- ใช้ Superconducting Magnetic bearing จะสามารถลดความสูญเสียทางกลจากแรงเสียดทานของลูกปืนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
- ทำเป็นระบบปิดสุญญากาศ เพื่อลดการสูญเสียจากแรงดัน อากาศ

### เอกสารอ้างอิง

[1] ศุภวัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา, “มอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์: ทฤษฎี และการ ออกแบบ”, แผนกคํารว ณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550

[2] T.J.E Miller, “Switched Reluctance Motors and Their Control”, NewYork: Oxford University Press, 1993

[3] T.J.E.Miller, **Electronic control of Switched Reluctance Machine**, Oxford:Newnes Power Engineering Series, 2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-สกุล : นายจिरายุ จันทร்பูล

วัน/เดือน/ปี : 6 สิงหาคม 2534

ที่อยู่ : 77/116 หมู่บ้านนราวดี ถนนนครอินทร์ ตำบลบางคูเวียง

อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี 11130

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย : โรงเรียนทวีธาภิเศก

E-mail : tin\_jirayu@hotmail.com



ชื่อ-สกุล : นางสาวชลธิชา เจริญรัตน์

วัน/เดือน/ปี : 8 กันยายน 2533

ที่อยู่ : 51/1 หมู่ 8 ตำบลโพธิ์สามต้น อำเภอบางปะหัน

จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13220

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย : โรงเรียนจอมสุรางค์อุปถัมภ์

E-mail : chonticha\_charoenrat@hotmail.com



ชื่อ-สกุล : นายฐิตินันท์ ตรงเจริญชัย

วัน/เดือน/ปี : 25 กรกฎาคม 2534

ที่อยู่ : 98/299 ถนนราชพฤกษ์ ตำบลท่าอิฐ อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี

11120

ประวัติการศึกษา : โรงเรียนนวมินทราชินูทิศบดินทรเดชา

E-mail : titinant@hotmail.com



ชื่อ-สกุล : นายณภัทร คล้ายทองคำ

วัน/เดือน/ปี : 10 ธันวาคม 2533

ที่อยู่ : 458 ถนนหลวงแพ่ง แขวงทัพยาว เขตลาดกระบัง กทม. 10520

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย : โรงเรียนพรตพิทยพยัต

E-mail : hamnapat@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้